



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# INFLUENCIA DE ELEVADAS TEMPERATURAS EN LA ADHERENCIA DE BARRAS DE FIBRA DE CARBONO CON EL HORMIGÓN



---

## TESIS DOCTORAL

Autor\_Fernando Cos-Gayón López

Directores\_Dr. Javier Benlloch Marco y  
Dr. Víctor Calvet Rodríguez

Valencia, Septiembre 2017



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS

TESIS DOCTORAL

# Influencia de Elevadas Temperaturas en la Adherencia de Barras de Fibra de Carbono con el Hormigón

Autor

Fernando Cos-Gayón López

Directores

Dr. Javier Benlloch Marco

Dr. Víctor Calvet Rodríguez

Valencia, Septiembre de 2017

# AGRADECIMIENTOS

A mis directores de tesis, Dr. Javier Benlloch Marco y Dr. Víctor Calvet Rodríguez, por el apoyo constante, las orientaciones y la total disponibilidad en cualquiera de las fases de esta investigación, fuera para fabricar hormigón o para discutir los resultados. Por las magníficas y rigurosas correcciones y, sobre todo, por el tiempo que he tenido el privilegio de compartir con vosotros.

Al Departamento de Construcciones Arquitectónicas y a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación de la Universitat Politècnica de València, por poner a mi disposición todas sus instalaciones y recursos.

A las empresas Marshall Composites Technologies LLC y Pulltrall INC, por facilitar las barras de CFRP necesarias para esta investigación.

A los Técnicos del laboratorio de materiales, Dr. Rafael Calabuig, D. Jesús Martínez y D. Manuel Calabuig, por su inestimable ayuda y apoyo.

A la Dra. Monste Haro, de la Escuela de Ingeniería de Materiales, por su implicación, paciencia y saber hacer en los ensayos experimentales complementarios.

Al Dr. Ángel Martín por sus consejos y orientación en el tratamiento de datos. A la Dra. Ana Belén Anquela, por estar siempre ahí, y velar para que esta tesis viera la luz.

A mis compañeros Dr. José Ramón Albiol, D. Elías Arilla, Dr. Carlos Ayats, Dr. Rafael Capuz, Dra. María Luisa Collado, Dr. Luis García, D. Juanjo Martínez, D. Vicente Monzó y Dr. Pedro Salinas, por ser referentes en mi vida universitaria.

## IV

A la familia con la que he sido bendecido, y que por su extensión no citaré en su totalidad; vosotros sabéis quienes sois.

A mis padres y hermano, por su entrega, su ejemplo y sus desvelos, que siempre me han alentado en la búsqueda de la excelencia.

A mis hijos Pablo, Marcos y Alba, por ser sal y luz en nuestras vidas.

Y a ti, Nereida, por estar siempre a mi lado; un regalo que celebro y agradezco cada nuevo amanecer.



# RESUMEN

La necesidad de mitigar los efectos de la corrosión en las estructuras de hormigón armado, y hacerlo de forma permanente, ha llevado a la propuesta de sustitución de las barras de acero por otros materiales que respondan adecuadamente ante la presencia de agua sin desarrollar procesos corrosivos.

Estas armaduras deberán garantizar la la seguridad y las condiciones de servicio de la estructura durante un periodo de vida útil y en condiciones climáticas muy adversas.

Uno de los materiales que están proponiéndose, y de facto ya sustituyendo en algunos lugares desde hace años, son las barras de polímero reforzado con fibras de carbono.

El presente trabajo estudia el comportamiento adherente de este tipo de barras ante elevadas temperaturas y durante largos períodos de tiempo.

Se ha planteado un plan experimental consistente en una serie de ensayos de pullout a diferentes edades días y condiciones térmicas, tanto en barras de CFRP con tratamientos superficiales de arenado y corrugado, como en barras de acero corrugado. .

Para determinar la influencia de las altas temperaturas en el hormigón, se han realizado ensayos de rotura a compresión de cada amasada realizada y a las mismas edades y temperaturas que las experimentadas en los ensayos de pullout.

Se ha completado el estudio con ensayos complementarios sobre las barras de CFRP de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía de fuerza atómica (AFM) de las muestras ensayadas a pullout.

Los resultados que se han obtenido para cada edad y temperatura pueden deberse a que las altas temperaturas afectan a las barras de CFRP corrugadas provocando una disminución de su tensión adherente, sin que afecten de manera determinante en el caso de las barras de CFRP arenadas. Se ha justificado el por qué de este comportamiento desigual así como la influencia combinada de las altas temperaturas en las edades de 180 días, debido al impacto del aumento de resistencia del hormigón.

# RESUM

La necessitat de mitigar els efectes de la corrosió en les estructures d'hormigó armat, i fer-ho de forma permanent, ha portat a la proposta de substitució de les barres d'acer per altres materials que responguin adequadament davant la presència d'aigua sense desenvolupar corrosius processos.

Aquestes armadures hauran de garantir la seguretat i les condicions de servei de la estructura durant un període de vida útil i en condicions climàtiques molt adverses.

Un dels materials que estan proposant, i de fet ja s'han substituït en alguns llocs des de fa anys, són les barres de polímer reforçat amb fibres de carboni.

El present treball estudia el comportament adherent d'aquest tipus de barres davant elevades temperatures i durant llargs períodes.

S'ha plantejat un pla experimental consistent en una sèrie d'assajos de pullout a diferents edats i condicions tèrmiques, tant en barres de CFRP com amb tractaments superficials d'arenado i corrugat, com en barres d'acer Corrugat. .

Per determinar la influència de les altes temperatures en el formigó, s'han realitzat assaigs de ruptura a compressió de cada amassada realitzada i a les mateixes edats i temperatures que les experimentades en els assaigs de retirada.

S'ha completat l'estudi amb assaigs complementaris sobre les barres de CFRP de microscopia òptica, microscopia electrònica de barrejat (SEM) i microscopia de força atòmica (AFM) de les mostres assajades a retirada.

## VIII

Els resultats que s'han obtingut per a cada edat i temperatura confirmen que les altes temperatures afecten les barres de CFRP Corrugadas provocant una disminució de la seva tensió adherent, sense que afectin de manera determinant en el cas de les barres de CFRP Arenadas. S'ha justificat el perquè d'aquest desigual comporta així com la influència combinada de les altes temperatures en les edats de 180 dies, a causa de l'impacte de l'augment de resistència del formigó.

# ABSTRACT

The need to mitigate the effects of corrosion on the reinforced concrete structure, and to do so permanently, has led to the proposal of replacing steel bars with other materials that respond adequately to the presence of water without developing corrosive processes.

These reinforcements shall ensure the safety and service conditions of the structure over a lifetime and in very adverse climatic conditions.

One of the materials being proposed, and de facto already replacing in some places for years, are the rods of polymer reinforced with carbon fibers.

The present work studies the adherent behavior of this type of bars at high temperatures and for long periods.

If it has planned a experimental plan consisting of a series of envelopes of different moments and conditional spatial environments, so much so that the CFRP with the surface of the surface of the arena and the corrugado, as in the barras of acero corrugado.

In order to determine the influence of the high temperatures in the concrete, tests of rupture to compression of each kneading performed and at the same ages and temperatures as those experienced in the pullout tests have been carried out.

The study was completed with complementary tests on the CFRP bars of optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM) of the samples tested at pullout.

The results obtained for each age and temperature confirm that the high temperatures affect Corrugated CFRP bars causing a decrease of

their adherent tension, without affecting in a decisive way in the case of CFRP bars. The reasons for this unequal behavior as well as the combined influence of high temperatures at the age of 180 days have been justified because of the impact of increased concrete strength.

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>III</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>V</b>
<b>RESUM.....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XV</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>XXV</b>
<b>NOTACIONES.....</b>	<b>XXVII</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 ESTADO DE LA CUESTIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 OBJETIVOS.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3 PLAN DE TRABAJO.....</b>	<b>8</b>
<b>1.4 METODOLOGÍA.....</b>	<b>9</b>
<b>2 ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 COMPOSICIÓN DE LAS BARRAS DE CFRP.....</b>	<b>13</b>
2.2.1 Matriz Polimérica.....	13
2.2.2 Refuerzo de Fibra de Carbono.....	22
2.2.3 Proceso de Fabricación.....	25
<b>2.3 TIPO DE BARRAS DE CFRP.....</b>	<b>28</b>
2.3.1 Grados de Resistencia y Módulo.....	28
2.3.2 Geometría Superficial.....	29

2.3.3	Diámetro de las Barras .....	31
2.3.4	Nomenclatura para la identificación de las barras de CFRP. 32	
<b>2.4</b>	<b>PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS BARRAS DE CFRP .....</b>	<b>32</b>
2.4.1	Densidad.....	33
2.4.2	Coefficiente de Expansión Térmica (CTE) .....	33
2.4.3	Conductividad Eléctrica. ....	35
<b>2.5</b>	<b>PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS BARRAS DE CFRP.....</b>	<b>35</b>
2.5.1	Tracción.....	35
2.5.2	Compresión .....	38
2.5.3	Cortante .....	39
<b>2.6</b>	<b>DURABILIDAD DE LAS BARRAS DE CFRP .....</b>	<b>40</b>
2.6.1	Efecto de la Temperatura .....	42
2.6.2	Efecto del Agua.....	49
2.6.3	Efecto de los cloruros.....	50
2.6.4	Efecto de los álcalis.....	50
2.6.5	Efecto de la Radiación Ultravioleta .....	50
2.6.6	Efecto de la Carbonatación del Hormigón .....	51
2.6.7	Comportamiento de las barras de CFRP a Largo Plazo... 51	
<b>2.7</b>	<b>ADHERENCIA DE LAS BARRAS CFRP CON EL HORMIGÓN ..</b>	<b>53</b>
2.7.1	Análisis del comportamiento adherente de las barras de CFRP con el hormigón. ....	55
<b>2.8</b>	<b>INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL COMPORTAMIENTO ADHERENTE DE LAS BARRAS DE CFRP CON EL HORMIGÓN.....</b>	<b>68</b>
2.8.1	Otros factores que afectan al comportamiento adherente de las barras de CFRP con el hormigón. ....	75
<b>3</b>	<b>PLAN EXPERIMENTAL .....</b>	<b>85</b>
<b>3.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>85</b>
<b>3.2</b>	<b>DESARROLLO DEL PLAN EXPERIMENTAL.....</b>	<b>87</b>
3.2.1	Planificación.....	87
3.2.2	Tratamiento de datos .....	91
<b>3.3</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS.....</b>	<b>95</b>
3.3.1	Hormigón .....	95
3.3.2	Barras de Acero.....	97



3.3.3	Barras de CFRP.....	97
<b>3.4</b>	<b>ENSAYOS PREVIOS.....</b>	<b>99</b>
3.4.1	Ensayos para ajuste de dosificación del hormigón .....	99
<b>3.5</b>	<b>ENSAYOS DE PULLOUT.....</b>	<b>101</b>
3.5.1	Ensayos de Pullout con Barras de Acero .....	114
3.5.2	Ensayos de Pullout con Barras de CFRP arenadas .....	116
3.5.3	Ensayos de Pullout con Barras de CFRP corrugadas.....	118
3.5.4	Gráficas resultados de ensayos pullout. ....	120
3.5.5	Imágenes para la caracterización de la forma de rotura de las barras .....	133
<b>3.6</b>	<b>ENSAYOS COMPLEMENTARIOS .....</b>	<b>140</b>
3.6.1	Ensayo de resistencia a compresión del hormigón .....	140
3.6.2	Ensayos de Microscopía Óptica .....	145
3.6.3	Ensayos de Microscopía Electrónica de Barrido “SEM”	161
3.6.4	Ensayos de Microscopía de Fuerza Atómica AFM.....	166
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>171</b>
<b>4.1</b>	<b>INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL COMPORTAMIENTO ADHERENTE DE LAS BARRAS DE CFRP .....</b>	<b>171</b>
4.1.1	Influencia de altas temperaturas en barras de Acero Corrugado. ....	172
4.1.2	Influencia de altas temperaturas en barras de CFRP arenadas .....	182
4.1.3	Influencia de altas temperaturas en barras de CFRP Corrugadas.....	202
4.1.4	Comparativa de influencia de altas temperaturas entre los diferentes acabados (barras de CFRP arenadas, CFRP corrugadas y de Acero).....	218
4.1.5	Correlación de datos y líneas de tendencia para evolución de tensiones adherentes en barras de CFRP.....	234
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>239</b>
<b>5.1</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>239</b>

5.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN..... 241

6 BIBLIOGRAFÍA..... 243

7 ANEXO I. GRÁFICAS..... 267

8 ANEXO II. SCRIPTS PARA ANÁLISIS DE DATOS CON  
MATLAB..... 349

# ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Fig. 1.1.- Fotografía de corrosión en armadura de acero debida a carbonatación del hormigón (Canet d'En Berenguer; Elaboración propia, 2017)</i> .....	2
<i>Fig. 1.2.- Evolución cronológica del uso y regulación de barras de FRP como armado para el hormigón</i> .....	3
<i>Fig. 1.3.- Aplicación de armado con barras de FRP. Crow Creek Brigde (Bettendorf, Iowa – USA, 2006)</i> .....	4
<i>Fig. 1.4.- Estructura de hormigón armado con barras de FRP en Dubai, Emiratos Árabes Unidos (2008)</i> .....	6
<i>Fig. 2.1.- Muestra de barras FRP (Fte. <a href="http://mguadagnini.staff.shef.ac.uk/frp/frp.php">http://mguadagnini.staff.shef.ac.uk/frp/frp.php</a>)</i> .....	11
<i>Fig. 2.2.- Representación esquemática de estructuras moleculares: Termoplástico (a) Lineal o (b) Ramificada) y Termoestable (c) Entrecruzada o (d) Reticulada. (Mallick, 1993).</i> .....	14
<i>Fig. 2.3.- Gráfica de las curvas de Tensión/Deformación, frente a esfuerzos de tracción y compresión, de la resina de poliéster. (FIB Task Group 9.3, 2007).</i> .....	21
<i>Fig. 2.4.- Imagen SEM de barra CFRP Arenada, donde se aprecian las fibras de carbono en la matriz polimérica (Imagen del autor, 2016).</i> .....	23
<i>Fig. 2.5.- Gráfica Tensión/Deformación de fibras para barras de FRP. a) Carbono con alto módulo elástico, b) Carbono de alta resistencia, c) Aramida, d) S-Glass, e) E-Glass, f) basalto (FIB, 2007)</i> .....	25
<i>Fig. 2.6.- Proceso de fabricación por Pultrusion (<a href="http://www.libertypultrusions.com/pultrusion-">http://www.libertypultrusions.com/pultrusion-</a></i> .....	26
<i>Fig. 2.7.- Proceso de fabricación de barras de FRP. (Marshall Composite Technologies, LLC)</i> .....	26
<i>Fig. 2.8.- Tipos de geometrías superficiales de barras de CFRP. (Suárez, F., 2011)</i> .....	31
<i>Fig. 2.9.- Gráfico Tensión/Deformación del composite CFRP y de sus componentes. (Calvet, 2014)</i> .....	35
<i>Fig. 2.10.- Comparativa Tensión/Deformación de diferentes barras FRP y con el acero (Calvet, 2014)</i> .....	36
<i>Fig. 2.11.- Distribución de las tensiones normales en una sección transversal de la barra FRP (Achillides, et al., 2004)</i> .....	37

<i>Fig. 2.12.- Influencia de dirección de la tensión aplicada en las barras de CFRP (FIB, 2007).</i>	38
<i>Fig. 2.13.- Reducción de diámetro y picado en superficie de fibra de carbono después de la exposición a 600 °C durante dos horas (Feih, 2009).</i>	43
<i>Fig. 2.14.- Pérdida de masa para las fibras de carbono a alta temperatura (Feih, 2009).</i>	43
<i>Fig. 2.15.- Típicas curvas tensión-deformación de diferentes barras a diferentes temperaturas (Hamad R. J., 2017).</i>	44
<i>Fig. 2.16.- Imágenes de barras FRP después de ensayos Pull out en diferentes temperaturas (Katz et al., 1999).</i>	45
<i>Fig. 2.17.- Comparación de la resistencia a la tracción en función de la temperatura para FPR y barras de acero (Wang et al., 2007).</i>	45
<i>Fig. 2.18.- Curvas típicas de deslizamiento en ensayos de adherencia de FRP y barras de acero a temperatura ambiente.</i>	46
<i>Fig. 2.19.- Módulo de elasticidad residual para barras FRP bajo temperaturas elevadas.</i>	46
<i>Fig. 2.20.- Relación tensión-deformación de la barra CFRP a 200 ° C (Wang et al., 2007).</i>	47
<i>Fig. 2.21.- Comparación de la resistencia a la tracción y el módulo elástico para barras de FRP con predicciones de Saafi: (a) resistencia a la tracción normalizada a temperaturas crecientes, (b) módulo de tracción normalizado a temperaturas crecientes (Wang et al., 2007).</i>	48
<i>Fig. 2.22.- Fuerzas de adherencia equilibradas por anillo de tracción, Tepfers (1973).</i>	54
<i>Fig. 2.23.- Ensayo de Pullout centrado. Dimensiones y características según ACI.440.3R-04.</i>	55
<i>Fig. 2.24.- Gráficas de curvas tipo ascendente en deslizamiento de ensayo pullout de barras de CFRP y GFRP a 23 ° C (Hamad R. J. et al., 2017).</i>	57
<i>Fig. 2.25.- Evolución de la respuesta adherente de un elemento de hormigón armado. En este caso, con armado de acero. (Fernández, 2003).</i>	57
<i>Fig. 2.26.- Gráfica Tensión Adherencia / Deslizamiento de barras CFRP con tratamiento superficial (Calvet, 2014; FIB, 2000).</i>	58
<i>Fig. 2.27.- Mecanismos de Adherencia y Deslizamiento. a) Deslizamiento relativo de la barra respecto del hormigón y acción de acuanamiento b) Adherencia por adhesión química, fricción y acuanamiento. (Adaptado; FIB, 2000).</i>	59
<i>Fig. 2.28.- Fisuras transversales longitudinales por splitting. (FIB, 2000).</i>	60
<i>Fig. 2.29.- Fallo en la interfaz entre hormigón y armadura de barras FRP (Achillides et al., 2004).</i>	61

<i>Fig. 2.30.- Barra CFRP corrugada ensayada por pullout, con rotura por corte de corrugas. a) Barra con corrugas seccionadas tras ensayo. b) Probeta de hormigón con restos de corruga tras ensayo (Elaboración propia, 2016).....</i>	<i>62</i>
<i>Fig. 2.31.- Barra CFRP Arena ensayada por pullout, con rotura desprendimiento completo de la capa de arena. a) Barra en la que ha desaparecido la capa de arena tras ensayo. b) Probeta de hormigón con restos de la capa de arena tras ensayo (Elaboración propia, 2016). .....</i>	<i>64</i>
<i>Fig. 2.32.- Comparativa de comportamiento adherente entre barras de CFRP y acero (Achillides et al., 2004).....</i>	<i>65</i>
<i>Fig. 2.33.- Gráfica Tensión adherente y Deslizamiento de barras de CFRP con recubrimiento de arena (Elaboración Propia, 2017).....</i>	<i>66</i>
<i>Fig. 2.34.- Curvas típicas de tensión-deslizamiento de la unión de diferentes muestras de ensayos pullout sometidas a diferentes temperaturas (Hammad, 2017). .....</i>	<i>70</i>
<i>Fig. 2.35.- Características de la tensión adherente y deformación en ensayos pullout con diferentes barras y temperaturas de exposición (Fu: fuerza máxima medida, SAF: carrera a fuerza máxima, EL: alargamiento de barra, UBS: tensión adherente, SABS: deslizamiento a máxima resistencia de unión, RUBS: resistencia residual final de la unión, CE: etapa final). (Hammad, 2017).....</i>	<i>71</i>
<i>Fig. 2.36.- Comportamiento de adherencia de las barras de CFRP Arenadas en ensayos de pullout a diferentes rangos de temperaturas (Álvarez et al., 2005).....</i>	<i>72</i>
<i>Fig. 2.37.- Resultados de rotura del compuesto en ensayos de flexión de barras de CFRP (Suárez, 2011).....</i>	<i>72</i>
<i>Fig. 2.38.- Resultados de ensayos pullout con gráficas Tensión / Deformación para barras CFRP expuestas a diferentes temperaturas (Hammad et al., 2017).....</i>	<i>73</i>
<i>Fig. 2.39.- Resistencia residual a tracción para barras FRP bajo temperaturas elevadas (Hammad et al., 2017). .....</i>	<i>74</i>
<i>Fig. 2.40.- Tiempos de exposición a temperaturas de estudio para ensayos de pullout en trabajo de Hammad et al. 2017 .....</i>	<i>75</i>
<i>Fig. 2.41.- Respuesta Tensión-Deformación de barras de acero y CFRP ( (Masood Rafi, 2007). .....</i>	<i>75</i>
<i>Fig. 2.42.- Gráfica comparativa del comportamiento adherente entre barras FRP con aramida, carbono y vidrio, y tratamientos de arena y hélice adherida, respectivamente (Aiello et al., 2007). .....</i>	<i>76</i>
<i>Fig. 2.43.- Composición y características del hormigón, y acabados y nomenclaturas de las barras (Baena et al., 2008).....</i>	<i>78</i>
<i>Fig. 2.44.- Comparativa Tensión Adherente según tipo hormigón (Baena et al., 2008).....</i>	<i>78</i>

<i>Fig. 2.45.- Ratio de incremento de la tensión adherente por cambio de hormigón (Baena et al., 2008) .....</i>	<i>79</i>
<i>Fig. 2.46.- Valores medios de la tensión adherente con respecto al tipo de barra y diámetro (Achillides, 2004). .....</i>	<i>79</i>
<i>Fig. 2.47.- Comparativa del comportamiento adherente de barras corrugadas (a) y arenadas (b) en ensayo de pullout con confinamiento (Malvar et al., 2004).....</i>	<i>81</i>
<i>Fig. 2.48.- Relación entre aumento de longitud de anclaje en barras CFRP y Tensión Máxima Adherente (1/2) (Achillides et al., 2004).....</i>	<i>82</i>
<i>Fig. 2.49.- Relación entre aumento de longitud de anclaje en barras CFRP y Tensión Máxima Adherente (2/2) (Achillides et al., 2004).....</i>	<i>83</i>
<i>Fig. 3.1.- Cámara de Curado, Laboratorio Dep. Construcciones Arquitectónicas, ETSIE, UPV. ....</i>	<i>89</i>
<i>Fig. 3.2.- a) Microscopio óptico, b) Microscopio Barrido Electrónico y c) Microscopio de Fuerza Atómica. UPV (Elaboración propia, 2016).....</i>	<i>90</i>
<i>Fig. 3.3.- Captura de pantalla parcial de script para cálculo de tensiones en 0.01, 0.1, 1 mm, respectivamente, tensión adherente máxima, alargamientos en extremos no tensionado y tensionado, respectivamente. Realizado con Matlab© (Elaboración propia, 2016). ....</i>	<i>94</i>
<i>Fig. 3.4.- Gráfica con ensayos de cemento utilizado en la tesis, (elaborada en Laboratorio Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas UPV, 2016) .....</i>	<i>95</i>
<i>Fig. 3.5.- Granulometría de los áridos (% Pasa). (elaborada en Laboratorio Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas UPV, 2016) .....</i>	<i>96</i>
<i>Fig. 3.6.- Barra CFRP arenada d14 (arriba), acero d12 (centro) y CFRP corrugada d12 (abajo).....</i>	<i>104</i>
<i>Fig. 3.8.- Molde de Pullout preparado para hormigonar, con la barra dispuesta, la cánula que garantiza la adherencia barra/hormigón en lc, tapones de ajuste colocados y desencofrante aplicado. ....</i>	<i>106</i>
<i>Fig. 3.9.- Dispositivo para sujeción de los tres captadores que medirán el desplazamiento del extremo tensionado durante el ensayo pullout. ....</i>	<i>107</i>
<i>Fig. 3.10.- Captador LVDT en extremo no tensionado de la barra en el ensayo de pullout. ....</i>	<i>107</i>
<i>Fig. 3.11.- Cámara de curado. ....</i>	<i>108</i>
<i>Fig. 3.12.- Cámara climática a 50° C.....</i>	<i>108</i>
<i>Fig. 3.13.- Cámara climática a 80° C.....</i>	<i>109</i>
<i>Para los ensayos de rotura por pullout se utilizó la prensa Ibertest modelo UIB 600 DAU, adaptada a la placa utilizada (Fig. 3.13), con módulo MBM Spider para LVDT (Fig. 3.14). ....</i>	<i>109</i>

<i>Fig. 3.15.- Prensa de ensayo pullout Ibertest UIB 600 DAU.....</i>	<i>109</i>
<i>Fig. 3.16.- Modulo MBM Spider y software de representación gráfica para la lectura de los LVDT durante el ensayo de pullout. ....</i>	<i>110</i>
<i>Fig. 3.17.- Identificación de probetas de pullout, ejemplo FCA 028/80-C. ....</i>	<i>112</i>
<i>Fig. 3.18.- Tipos de rotura: PO (a), RA (b) y RC (c). ....</i>	<i>113</i>
<i>Fig. 3.19.- Evolución Tensión / Deformación de las probetas con barras de CFRP corrugadas a 28 días según temperatura de 20°, 50° y 80° C. ....</i>	<i>124</i>
<i>Fig. 3.20.- Evolución tensión / deformación de las probetas con barras de CFRP corrugadas a 60 días según temperatura de 20°, 50° y 80° C. ....</i>	<i>125</i>
<i>Fig. 3.21.- Evolución tensión / deformación de las probetas con barras de CFRP corrugadas a 180 días según temperatura de 20°, 50° y 80° C. ....</i>	<i>126</i>
<i>Fig. 3.22.- Evolución tensión / deformación de las probetas con barras de CFRP arenadas a 28 días según temperatura de 20°, 50° y 80° C.....</i>	<i>127</i>
<i>Fig. 3.23.- Evolución tensión / deformación de las probetas con barras de CFRP arenadas a 60 días según temperatura de 20°, 50° y 80° C.....</i>	<i>128</i>
<i>Fig. 3.24.- Evolución tensión / deformación de las probetas con barras de CFRP arenadas a 180 días según temperatura de 20°, 50° y 80° C.....</i>	<i>129</i>
<i>Fig. 3.25.- Evolución tensión / deformación de las probetas con barras de acero a 28 días según temperatura de 20°, 50° y 80° C.....</i>	<i>130</i>
<i>Fig. 3.26.- Evolución tensión / deformación de las probetas con barras de acero a 60 días según temperatura a 20°, 50° y 80° C. ....</i>	<i>131</i>
<i>Fig. 3.27.- Evolución Tensión / Deformación de las probetas con barras de acero a 180 días según temperatura a 20°, 50° y 80° C. ....</i>	<i>132</i>
<i>Fig. 3.28.- Probetas ya sometidas a ensayo de pullout y posteriormente partidas de modo que quede vista la zona adherente hormigón / Barra, permitiendo la extracción de la barra para seguir con ensayos complementarios. ....</i>	<i>133</i>
<i>Fig. 3.35.- Probeta ACC 180/20-50-80 para ensayo de resistencia a compresión de cada amasada de hormigón en cada rango de temperatura, una vez cortadas en tres unidades. ....</i>	<i>141</i>
<i>Fig. 3.36.- Corte de probeta para ensayo a compresión del hormigón en tres unidades de 100x100x100 mm, para garantizar homogeneidad de la muestra. ....</i>	<i>142</i>
<i>Fig. 3.37.- Gráfica de tendencia de evolución de resistencia a compresión del hormigón según edad y temperatura. ....</i>	<i>144</i>
<i>Fig. 3.38.- Gráfica de % de pérdida de resistencia a compresión debido a altas temperaturas, ordenado por edades del hormigón.....</i>	<i>145</i>
<i>Fig. 3.39.- Lote de probetas a ensayar con Microscopio Óptico. ....</i>	<i>146</i>
<i>Fig. 3.40.- Probeta en Microscopio Óptico.....</i>	<i>147</i>
<i>Fig. 3.44.- MO/CA_80/28d. Arriba, Interfaz núcleo geometría superficial. Abajo, núcleo de la barra.....</i>	<i>150</i>

Fig. 3.45.- MO/CA_20/60d. Arriba, Interfaz núcleo geometría superficial. Abajo, núcleo de la barra.....	151
Fig. 3.46.- MO/CA_50/60d. Arriba, Interface núcleo geometría superficial. Abajo, daños en zona interfaz. ....	152
Fig. 3.47.- MO/CA_80/60d. Arriba, Interface núcleo geometría superficial, donde se observa agrietamiento entre fibras. Abajo, daños en zona de núcleo con agrietamiento en resina. ....	153
Fig. 3.48.- MO/CA_180/20d. Arriba, Interfaz núcleo geometría superficial. Abajo, zona de núcleo de la barra. ....	154
Fig. 3.49.- MO/CA_180/50d. Arriba, daños en fibras y matriz en interface núcleo con geometría superficial. Abajo, fisuración de la matriz polimérica en núcleo de la barra. ....	155
Fig. 3.50.- MO/CA_180/80d. Arriba, daños severos en interfaz núcleo geometría superficial. Abajo, agrietamiento de la matriz polimérica en zona de núcleo de la barra. ....	156
Fig. 3.51.- MO/CC_20/28d. Izquierda, Interfaz núcleo/corruga. Derecha, núcleo de la barra. ....	157
Fig. 3.52.- MO/CC_50/28d. Izquierda, Interfaz núcleo/corruga. Derecha, núcleo de la barra. ....	157
Fig. 3.53.- MO/CC_80/28d. Izquierda, Interfaz núcleo / corruga. Derecha, núcleo de la barra, donde se aprecian focos más oscuros con daños en matriz polimérica. ....	157
Fig. 3.54.- MO/CC_20/60d. Izquierda, Interfaz núcleo/corruga. Derecha, núcleo de la barra. ....	158
Fig. 3.55.- MO/CC_50/60d. Izquierda, Ala de barra. Derecha, núcleo de la barra. ....	158
Fig. 3.56.- MO/CC_80/60d. Izquierda, corruga. Derecha, núcleo de la barra, donde se aprecian daños en matriz polimérica y agrupación de fibras.....	158
Fig. 3.57.- MO/CC_20/180d. Izquierda, zona corruga. Derecha, núcleo de la barra. ....	159
Fig. 3.58.- MO/CC_50/180d. Izquierda, zona ala de la barra. Derecha, núcleo de la barra. ....	159
Fig. 3.59.- - MO/CC_80/180d. Arriba, daños en zona ala de la barra. Abajo, daños en fibras y matriz polimérica en núcleo de la barra. ....	160
Fig. 3.60.- MS/CA_20/180 x20 (se aprecia reordenamiento de fibras en x por las tensiones producidas en ensayo Pullout) .....	163
Fig. 3.61.- MS/CA_20/180 x250 (con este aumento ya se observan zonas alteradas en matriz polimérica).....	163



<i>Fig. 3.62.- MS/CA_20/180 x2000 (se observa que esas zonas alteradas en matriz polimérica también tienen destrucción de fibras) .....</i>	<i>164</i>
<i>Fig. 3.63.- MS/CA_20/180 x5000 (con este nivel de aumento se puede estudiar el comportamiento de la matriz polimérica de la barra) .....</i>	<i>164</i>
<i>Fig. 3.64.- MS/CA_80B/180 x2500 (se observa el interfaz, con los diferentes componentes en la matriz polimérica).....</i>	<i>165</i>
<i>Fig. 3.65.- MS/CA_80B/180 x5000 (se observa el severo deterioro de la matriz polimérica en una zona de la barra) .....</i>	<i>165</i>
<i>Fig. 3.66.- Izquierda, Microscopio de Fuerza Atómica; Derecha, visualización en pantalla de avance del ensayo, donde se aprecia la punta oscilante.....</i>	<i>166</i>
<i>Fig. 3.67.- Imagen obtenida tras el ensayo AFM.....</i>	<i>167</i>
<i>Fig. 3.68.- En esta imagen obtenida tras el ensayo AFM, los diferentes colores muestran variaciones en el material, distinguiéndose claramente las fibras y la matriz polimérica, así como los daños en ambos.....</i>	<i>168</i>
<i>Fig. 4.1.- Gráficas de valores medios de tensión normalizada las probetas con barras de Acero d12 (ACC) ensayadas a Pullout, organizada por Temperatura y en función de las edades estudiadas en esta investigación.....</i>	<i>173</i>
<i>Fig. 4.2.- Gráfica de valores medios de tensión adherente normalizada de las probetas con barras de Acero d12 (ACC) ensayadas a pullout, organizada por Edad y en función de las temperaturas estudiadas en esta investigación.....</i>	<i>173</i>
<i>Fig. 4.3.- Gráficas de valores medios de tensión máxima las probetas con barras de Acero d12 (ACC) ensayadas a Pullout, organizada por Temperatura y en función de las edades estudiadas en esta investigación.....</i>	<i>174</i>
<i>Fig. 4.4.- Gráfica de valores medios de tensión adherente máxima de las probetas con barras de acero d12 (ACC) ensayadas a pullout, organizada por Edad y en función de las temperaturas estudiadas en esta investigación.....</i>	<i>175</i>
<i>Fig. 4.5.- Gráfica de comportamiento adherente de las barras de Acero en ensayo pullout a 28 días, con temperaturas de 20, 50 y 80 °C.....</i>	<i>176</i>
<i>Fig. 4.6.- Gráfica de comportamiento adherente de las barras de Acero en ensayo pullout a 60 días, con temperaturas de 20, 50 y 80 °C.....</i>	<i>176</i>
<i>Fig. 4.7.- Gráfica de comportamiento adherente de las barras de acero en ensayo pullout a 180 días, con temperaturas de 20, 50 y 80 °C.....</i>	<i>177</i>
<i>Fig. 4.8.- Pantalla de los equipos de medida de la prensa de ensayo a Pullout en la que la gráfica tensión adherente y desplazamiento se asemeja a la gráfica tensión/deformación del acero ensayado a tracción, y en la que se aprecia el paso de régimen elástico a plástico de la barra de acero.....</i>	<i>178</i>
<i>Fig. 4.9.- Gráficas de porcentajes apilados para barras de Acero d12, por tipo de adherencia movilizada en los ensayos de pullout.....</i>	<i>180</i>

<i>Fig. 4.10.- Modo de rotura pullout, por arrancamiento del anclaje mecánico entre corrugas.</i>	181
<i>Fig. 4.12.- Gráfica de valores medios de tensión normalizada de las probetas con barras de CFRP Arenadas d14 (FCA) ensayadas a Pullout, organizada por Temperatura y en función de las edades estudiadas en esta investigación.</i>	182
<i>Fig. 4.13.- Gráfica de valores medios de tensión máxima de las probetas con barras de CFRP Arenadas d14 (FCA) ensayadas a Pullout, organizada por Temperatura y en función de las edades estudiadas en esta investigación.</i>	184
<i>Fig. 4.14.- Imágenes tomadas inmediatamente después de ensayar a pullout dos probetas, la de la izquierda habiendo estado 180 días a 80 °C y la de la derecha 180 días a 20 °C y saturada de humedad.</i>	185
<i>Fig. 4.15.- Gráfica de valores medios de tensión adherente normalizada de las probetas con barras de CFRP Arenadas d14 (FCA) ensayadas a pullout, organizada por Edad y en función de las temperaturas estudiadas en esta investigación.</i>	186
<i>Fig. 4.16.- Gráfica de valores medios de tensión adherente máxima de las probetas con barras de CFRP arenadas d14 (FCA) ensayadas a pullout, organizada por Edad y en función de las temperaturas estudiadas en esta investigación.</i>	187
<i>Fig. 4.17.- a) Imagen de la superficie de la longitud adherente en barras de CFRP arenadas ensayada a 28 días a 80 °C. b). Imagen de la superficie de la longitud adherente en barras de CFRP arenadas ensayada a 180 días a 80 °C.</i>	188
<i>Fig. 4.18.- Gráficas de porcentajes apilados para barras de CFRP Arenadas d14, por tipo de adherencia movilizada en los ensayos de pullout.</i>	189
<i>Fig. 4.19.- Gráfica de comportamiento adherente de las barras de CFRP Arenadas en ensayo pullout a 28 días, con temperaturas de 20, 50 y 80 °C.</i>	190
<i>Fig. 4.20.- Gráfica de comportamiento adherente de las barras de CFRP Arenadas en ensayo pullout a 180 días, con temperaturas de 20, 50 y 80 °C.</i>	191
<i>Fig. 4.21.- Modo de rotura de las barras de CFRP Arenadas en ensayo de pullout, por desprendimiento completo del recubrimiento de arena de sílice del núcleo de la barra.</i>	192
<i>Fig. 4.23.- Deterioro de la resina polimérica en zona de interfaz debida a la acción de la temperatura de 80 °C durante 180 días, con pérdida de adherencia a fibras y fisuración generalizada en las zonas sin fibras.</i>	194
<i>Fig. 4.25.- Imagen SEM x20 del núcleo de la barra CFRP Arenada al ser ensayada a pullout, sin daños en el núcleo.</i>	196
<i>Fig. 4.26.- Imagen SEM x500 del núcleo de las barras de CFRP Arenadas que no presenta daños.</i>	196
<i>Fig. 4.27.- Imagen SEM x10000. Daños en la resina de la matriz polimérica en probeta FCA180/80A.</i>	197

<i>Fig. 4.28.- Imagen SEM x2000. Agrietamiento en interfaz núcleo y recubrimiento arenado de probeta FCA060/80A.</i>	198
<i>Fig. 4.29.- Imagen SEM x5000. Daños en resinas de matriz polimérica por agrietamiento y separación de fibras en interfaz de probeta FCA060/80A.</i>	198
<i>Fig. 4.30.- Imagen AFM de la Probeta FCA180/80A. (1/2)</i>	199
<i>Fig. 4.31.- Imágenes AFM de la Probeta FCA180/80A. (2/2)</i>	200
<i>Fig. 4.32.- Gráfica de valores medios de tensión normalizada de las probetas con barras de CFRP corrugadas d12 (FCC) ensayadas a Pullout, organizada por Temperatura y en función de las edades estudiadas en esta investigación.</i>	202
<i>Fig. 4.33.- Gráfica de valores medios de tensión máxima de las probetas con barras de CFRP corrugadas d12 (FCC) ensayadas a Pullout, organizada por Temperatura y en función de las edades estudiadas en esta investigación.</i>	203
<i>Fig. 4.34.- Gráfica de valores medios de tensión adherente normalizada de las probetas con barras de CFRP Corrugadas d12 (FCC) ensayadas a pullout, organizada por Edad y en función de las temperaturas estudiadas en esta investigación.</i>	204
<i>Fig. 4.35.- Gráfica de valores medios de tensión adherente máxima de las probetas con barras de CFRP Corrugadas d12 (FCC) ensayadas a pullout, organizada por Edad y en función de las temperaturas estudiadas en esta investigación.</i>	204
<i>Fig. 4.36.- Imagen microscopio digital de barra de CFRP corrugada d12, con detalle de las corrugas y el ala.</i>	206
<i>Fig. 4.37.- Imagen SEM x1000 de la corruga de barra de CFRP Corrugadas d12.</i>	206
<i>Fig. 4.38.- Gráficas de porcentajes apilados para barras de CFRP Corrugadas d12, por tipo de adherencia movilizada en los ensayos de pullout.</i>	207
<i>Fig. 4.39.- Gráfica de comportamiento adherente de las barras de CFRP Corrugadas en ensayo pullout a 28 días, con temperaturas de 20, 50 y 80 °C.</i>	208
<i>Fig. 4.40.- Gráfica de comportamiento adherente de las barras de CFRP Corrugadas en ensayo pullout a 180 días, con temperaturas de 20, 50 y 80 °C.</i>	209
<i>Fig. 4.41.- Imágenes tomadas a la longitud adherente de la probeta FCC028/20B tras el ensayo de pullout, donde se observan corrugas conservadas, seccionadas y semi arrancadas.</i>	210
<i>Fig. 4.42.- Montaje de imágenes de barra de CFRP corrugadas. a) Imagen SEM de interfaz corruga/núcleo, b) Resto de corrugas adheridas al hormigón, una vez han sido arrancadas en pullout, c) Imagen microscopio digital de barra tras arrancamiento de corruga por pullout, y d) Longitud adherente de barra con total seccionamiento de las corrugas.</i>	211
<i>Fig. 4.43.- Imagen SEM x250 de l núcleo de la barra de la probeta FCC180/80B, con daños generalizados en la resina.</i>	212

Fig. 4.44.- Imagen SEM x500 del núcleo de la barra de la probeta FCC180/80B, con daños severos en la resina. .... 213

Fig. 4.45.- Imagen SEM x2000 del núcleo de la barra de la probeta FCC180/80B, con daños severos en la resina. .... 214

Fig. 4.46.- Imagen SEM de organización interna de las fibras del núcleo de la barra CFRP Corrugada al ser ensayada a pullout, exigiéndole a las fibras por transmisión desde interfaz de corrugas ancladas al hormigón..... 215

Fig. 4.47.- Imagen SEM de colapso de las fibras en el núcleo de las barra de la probeta FCC060/50C de CFRP Corrugadas debido a la alineación de las cargas y el deterioro de la resina de la matriz polimérica. .... 215

Fig. 4.48.- Imagen AFM de probeta FCC180/80C. .... 216

Fig. 4.49.- Imagen AFM de probeta FCC180/80C. .... 217

Fig. 4.50.- Gráfica comparativa evolución de las probetas FCC y FCA de tensión / Deformación del extremo no tensionado a 28 días y a 20, 50 y 80 °C..... 219

Fig. 4.51.- Gráfica comparativa evolución de las probetas FCC y FCA de tensión / Deformación del extremo no tensionado a 60 días y a 20, 50 y 80 °C..... 220

Fig. 4.52.- Gráfica comparativa evolución de las probetas FCC y FCA de tensión / Deformación del extremo no tensionado a 180 días y a 20, 50 y 80 °C..... 221

Fig. 4.53.- Concentración de los esfuerzos axiales en las fibras del núcleo de la barra de CFRP Corrugada..... 223

Fig. 8.1.- QR para descarga de compilación de scripts para MatLab R2014b ... 349

# ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1. Comparativa de ventajas e inconvenientes de las resinas termoestables y termoplásticas. (Elaboración propia, 2016)</i> .....	16
<i>Tabla 2.2.- Propiedades físicas y mecánicas de características principales Resinas Poliméricas. PEEK (Poliéter éter cetona), PPS (Polipropileno), PSUL (Polisulfona). (Elaboración propia, 2017).</i> .....	16
<i>Tabla 2.3.- Propiedades de las fibras de refuerzo de barras de FRP. (Suárez, F., 2011)</i> .....	24
<i>Tabla 2.4.- Valores de resistencia a tracción y módulo elástico de barras FRP comparado con Acera (Suárez, F., 2011)</i> .....	29
<i>Tabla 2.5.- Densidad de las barras de FRP, según FIB, 2007 (Boletín n° 40 FIB, 2007)</i> .....	33
<i>Tabla 2.6.- Coeficientes de Expansión Térmica (CTE) de barras FRP (FIB, 2007)</i> .....	34
<i>Tabla 2.7.- Propiedades mecánicas a tracción de barras FRP y acero (Calvet, 2014).</i> .....	37
<i>Tabla 2.8.- Resultados de ensayos de resistencia a tracción a diferentes temperaturas en barras de CFRP. (Wang et al., 2007)</i> .....	44
<i>Tabla 2.9.- Comparativa de datos ensayos de adherencia pullout en barras corrugadas CRFP y Acero (Calvet, 2014).</i> .....	61
<i>Tabla 2.10.- Comparativa de datos de ensayos de adherencia por pullout en barras de CFRP arenadas y de acero corrugadas (Calvet, 2014).</i> .....	63
<i>Tabla 3.1.- Métodos de ensayo para barras utilizadas para reforzar o pretensar hormigón (ACI 440.3R-12, 2012).</i> .....	86
<i>Tabla 3.2.- Dosificación del Hormigón utilizado en la investigación (Elaboración propia, 2016)</i> .....	96
<i>Tabla 3.3.- Valores medios de las propiedades definidas por el fabricante para las barras de acero corrugado ACC 12 (Elaboración propia).</i> .....	97
<i>Tabla 3.4.- Propiedades definidas por el fabricante para la barra de CFRP Corrugada FCC 12 (Elaboración propia, 2016)</i> .....	98
<i>Tabla 3.5.- Propiedades definidas por el fabricante para la barra de CFRP Arenada FCA 14 (Elaboración propia, 2016).</i> .....	99
<i>Tabla 3.6.- Longitudes de Adherencia y Cánula por tipo de barra.</i> .....	105
<i>Tabla 3.7.- Datos de ensayos de pullout de las barras de acero.</i> .....	114

*Tabla 3.8.- Datos de ensayo de pullout de barras de acero, tensión con deslizamientos de 0,01 mm, 0,1 mm y a 1 mm, los desplazamientos en extremo no tensionado ( $\delta_{ENT}$ ), extremo tensionado ( $\delta_T$ ), tensión máxima y tensión media normalizada. .... 115*

*Tabla 3.9.- Datos ensayos de pullout de barras de CFRP Arenadas..... 116*

*Tabla 3.10.- Datos de ensayo de pullout de barras de CFRP arenadas, tensión con deslizamientos de 0,01 mm, 0,1 mm y a 1 mm, los desplazamientos en extremo no tensionado ( $\delta_{ENT}$ ), extremo tensionado ( $\delta_T$ ), tensión máxima y tensión media normalizada. .... 117*

*Tabla 3.11.- Datos ensayos de pullout de barras de CFRP corrugadas..... 118*

*Tabla 3.12.- Datos de ensayo de pullout de barras de CFRP corrugadas, tensión con deslizamientos de 0,01 mm, 0,1 mm y a 1 mm, los desplazamientos en extremo no tensionado ( $\delta_{ENT}$ ), extremo tensionado ( $\delta_T$ ), tensión máxima y tensión media normalizada. .... 119*

*Tabla 3.13.- Evolución de las tensiones normalizadas alcanzadas durante el ensayo para..... 120*

*Tabla 3.14.- Evolución de las tensiones máximas alcanzadas durante el ensayo para ..... 121*

*Tabla 3.15.- Evolución de tensiones normalizadas alcanzadas en función del periodo mantenido en cada una de las temperaturas..... 122*

*Tabla 3.16.- Evolución de tensiones máximas alcanzadas en función del periodo mantenido en cada una de las temperaturas. .... 123*

*Tabla 3.17.- Resultados de los ensayos para determinar la resistencia a compresión del hormigón utilizado para confeccionar las probetas de pullout..... 143*

*Tabla 3.18.- Valores medios de resistencia a compresión del hormigón ordenados por edades y temperaturas..... 144*

# NOTACIONES

$\alpha$	<i>Inclinación de flanco de la corruga (<math>^{\circ}</math>)</i>
$A_b$	<i>Área equivalente de la barra (<math>\text{mm}^2</math>)</i>
$a_m$	<i>Altura media de la corruga de la barra (mm)</i>
$a_s$	<i>Parámetro de adherencia, adimensional</i>
$\beta$	<i>Ángulo de inclinación de la corruga transversal (<math>^{\circ}</math>)</i>
$b$	<i>Anchura zona superior de corruga (mm)</i>
$c$	<i>Distancia entre dos corrugas de la barra consecutivas, (mm).</i>
$C_b$	<i>Perímetro equivalente de la barra, (mm)</i>
$C.T.E.$	<i>Coefficiente de transmisión térmica</i>
$d$	<i>Anchura zona inferior de corruga (mm)</i>
$d_b$	<i>Diámetro equivalente de la barra (mm)</i>
$d_n$	<i>Diámetro nominal de la barra (mm)</i>
$e_1, e_2$	<i>Espesor de las alas de barra corrugada (mm)</i>
$E_L$	<i>Módulo de elasticidad de las barras de acero (MPa)</i>
$E_{FRP}$	<i>Módulo de elasticidad de las barras de FRP (MPa)</i>
$F$	<i>Fuerza aplicada (kN)</i>
$F_c$	<i>Resistencia a compresión del hormigón (MPa)</i>
$F_{cm}$	<i>Resistencia media a compresión del hormigón a 28 días (MPa)</i>
$f_{ct}$	<i>Resistencia a tracción del hormigón (MPa)</i>

$f_{ctm}$	<i>Resistencia a tracción media del hormigón (MPa)</i>
$f_u$	<i>Resistencia a tracción de la barra de FRP (MPa)</i>
$f_{LE}$	<i>Resistencia a tracción a límite elástico de la barra de FRP (MPa)</i>
$L_a$	<i>Longitud de anclaje (mm)</i>
$L_{a,min}$	<i>Longitud de anclaje mínima (mm)</i>
$L_t$	<i>Longitud total de la barra (mm)</i>
$L_e$	<i>Longitud de ensayo (mm)</i>
$L_{adh}$	<i>Longitud adherente de las barras en el ensayo de pullout (mm)</i>
$\tau$	<i>Tensión adherente (MPa)</i>
$\tau_{max}$	<i>Tensión adherente máxima (MPa)</i>
$W_c$	<i>Longitud corruga de hormigón que produce el acuñaamiento (mm)</i>
$W_f$	<i>Ancho de la corruga de la barra (mm)</i>
$\epsilon_u$	<i>Deformación bajo carga máxima de la barra (%)</i>
$\epsilon_r$	<i>Deformación de rotura de la barra (%)</i>
$\epsilon_E$	<i>Deformación a límite elástico de la barra (%)</i>
$\delta_{ET}$	<i>Deslizamiento en extremo tensionado de la barra (mm)</i>
$\delta_{ET}$	<i>Deslizamiento en extremo no tensionado de la barra (mm)</i>



# 1 INTRODUCCIÓN

Los elevados requerimientos estructurales que las nuevas edificaciones en el campo de la Arquitectura y la Ingeniería precisan, están suponiendo un reto para el conocimiento, así como la exploración de nuevos materiales y métodos constructivos con los que satisfacer esas necesidades.

Asimismo, los condicionantes tradicionales para los asentamientos humanos han variado de tal modo que es posible levantar ciudades donde hace apenas unos decenios habría sido impensable. Y esto hace que las condiciones climáticas donde se ubican estas construcciones puedan llegar a ser extremas, con altísimas temperaturas que afectan de manera directa al comportamiento de los materiales y a su capacidad resistente.

A estos materiales se les exige, además, que garanticen la seguridad y las condiciones de servicio de la estructura durante un periodo de vida útil cada vez más largo, debido al ingente volumen de materiales, mano de obra y coste que precisan.

Con relación a las estructuras de hormigón armado, se necesitan materiales que sustituyan al acero en las armaduras, y recientemente se están utilizando barras de polímero reforzado con fibras carbono (CFRP).

Las ventajas de este material frente al acero son evidentes y sustanciales, mejorando su resistencia a tracción, su durabilidad frente a la corrosión y, además, es mucho más ligero, lo que beneficia en términos de peso propio estructural.

## 1.1 Estado de la cuestión

El acero es el material más utilizado en el hormigón armado, para cualquier uso. Su excelente comportamiento a tracción y su compatibilidad con el hormigón lo hacen idóneo a efectos de cálculo estructural.

Pero el armado de acero puede estar expuesto a ambientes agresivos, tales como concentración de cloruros (estructuras marinas y sales para deshielo), bajas y altas temperaturas y humedad, que pueden producir la degradación y pérdida de servicio de la estructura. (Fig. 1.1) Esto genera unos considerables gastos de mantenimiento y reparación, pudiendo llegar a condicionar la vida útil de la estructura.



Fig. 1.1.- Fotografía de corrosión en armadura de acero debida a carbonatación del hormigón (Canet d'En Berenguer; Elaboración propia, 2017)

Se estima que el coste de reparación y mantenimiento de las actuales infraestructuras en todo el mundo supera los 100 mil millones de euros (Faza S. , 1991; Castañeda-Valdez, A. et al., 2014). Una gran

proporción de este gasto está dedicado a tratar de hacer frente a problemas de durabilidad en las estructuras de hormigón.

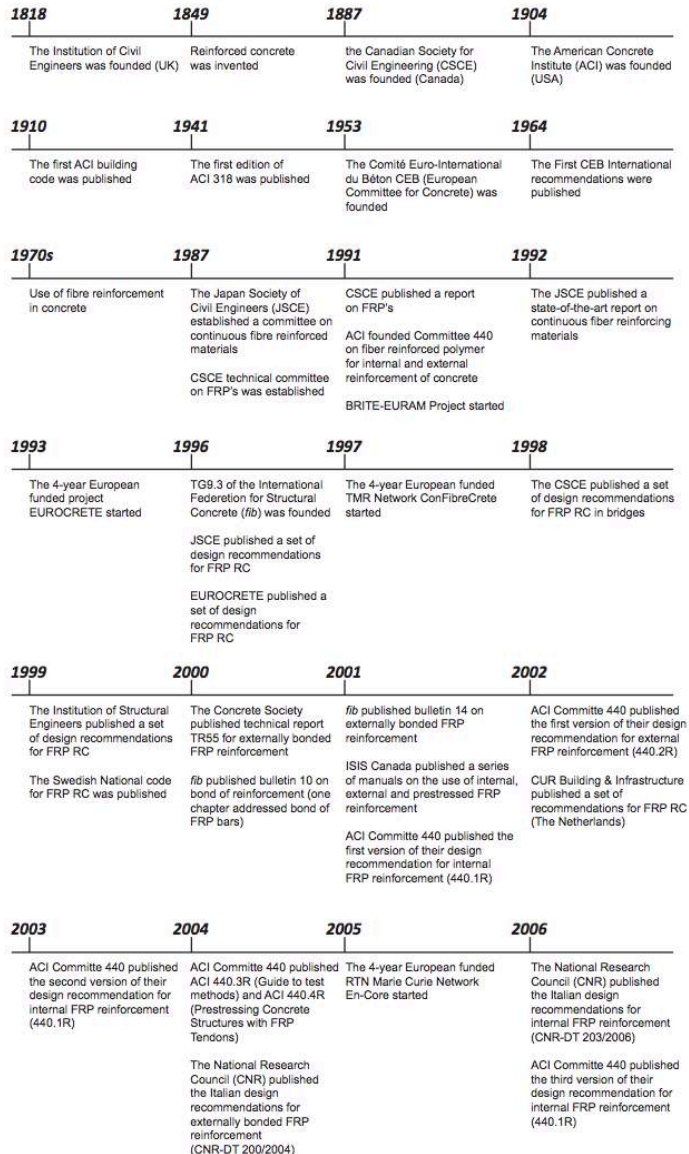


Fig. 1.2.- Evolución cronológica del uso y regulación de barras de FRP como armado para el hormigón.

El entorno alcalino de hormigón normalmente proporciona la protección necesaria para refuerzo de acero convencional del entorno. No obstante, cuando se expone o cuando el entorno alcalino se neutraliza, se corroe el acero provocando daños en los elementos estructurales. El ataque ambiental es implacable y tarde o temprano las propiedades alcalinas del recubrimiento de hormigón se reducen y se produce la corrosión y el deterioro de hormigón armado, con desprendimientos que potencian aun más los daños. (Holland, 1997).

Se han incluido revestimientos de hormigón como primera opción para detener la entrada de  $\text{CO}_2$ . Sin embargo, la mayoría de estas soluciones, además de su elevado costes, no erradican el problema, únicamente retrasan el problema.

Los refuerzos de FRP aparecieron en el mercado en la década de 1990 como otra solución al problema de la corrosión (Clarke, 1993; Bakis, 1993), a pesar de que la capacidad de estos compuestos para resistir el ambiente alcalino del hormigón no se ha investigado a fondo (Fig. 1.2).

Por ello, son muchas las expectativas de crecimiento en el uso de FRP en hormigón para evitar la corrosión en estructuras en entornos marinos, alta humedad, plantas químicas e industriales o en elementos estructurales que requieren un espesor mínimo.



Fig. 1.3.- Aplicación de armado con barras de FRP. Crow Creek Brigde (Bettendorf, Iowa – USA, 2006)

La mayoría de las aplicaciones iniciales de refuerzo de FRP en hormigón fueron construidas en Japón, donde se han desarrollado numerosos proyectos desde principios de los 90. Actualmente, se está investigando y desarrollando activamente en América del Norte y Europa (Fig. 1.3).

Como alternativa al acero, durante los últimos veinte años, se han realizado muchos estudios sobre materiales de FRP. Se encontró que estos materiales compuestos no corrosivos pueden aplicarse eficazmente en la construcción de hormigón armado como alternativa al refuerzo de acero en tres formas diferentes:

- Láminas de FRP unidas externamente o placas para reparación o refuerzo de estructura de hormigón armado.
- Refuerzo principal en el Forma de barras de FRP.
- Tendones de pretensado en estructuras de hormigón pretensado.

Su uso se ha intensificado, sobre todo, en el ámbito de la rehabilitación, a modo de refuerzos, sustituyendo las barras de acero que habían sufrido corrosión.

Pero el planteamiento es más ambicioso, pretendiendo una sustitución total de las armaduras de acero por las de estos compuestos. Así, se vienen utilizando los compuestos de resinas reforzados con carbono, fibra de vidrio o aramida, de manera, significativa, en entornos de agresividad ambiental.

Los FRP poseen ventajas y desventajas. Sus ventajas incluyen alta resistencia a corrosión, relaciones de alta resistencia a peso (10-15 veces mayor que el acero), excelentes características de fatiga (alrededor de 3 veces la del acero), neutralidad electromagnética y facilidad de puesta en obra, que conduce a reducir los costes de construcción.

Por otro lado, las desventajas incluyen el alto coste de material, la baja ductilidad con rotura frágil, baja resistencia al cizallamiento debido a las malas propiedades mecánicas de la matriz, así como la pérdida rápida y severa de la adherencia, resistencia y rigidez a temperaturas elevadas.



Fig. 1.4.- Estructura de hormigón armado con barras de FRP en Dubai, Emiratos Árabes Unidos (2008)

Dada la versatilidad de estas barras, y los condicionantes de asentamientos humanos en lugares de climas extremos, con proximidad a ambientes marino y temperaturas elevadísimas, frente a las evidentes ventajas, cabe acotar la influencia que las altas temperaturas tienen sobre estas barras (Fig. 1.4).

La investigación sobre los compuestos de polímeros reforzados con fibras son abundantes (Achillides & Pilakoutas, 2004; Al-Zahrani, 1999; Baena, 2009; Benmokrane B. T., 1996; Byars A. W., 2001; Chang, 2001; Davalos, 2008; Edwards A.D., 1978; Gibson, 1994; Malvar L. , 1995; Nanni A., 1993; Schwartz, 1992; Tepfers R., 1973; Wang N. E., 1995; Yuan W. M., 2001). Pero no así los que profundizan en los mecanismos de adherencia y en la influencia de altas temperaturas en los hormigones armados con este material

(Achillides et al., 2004, Aiello et al., 2007, Davalos et al., 2008; Hamad et al., 2017)

Reseñar como especialmente relevante el trabajo de investigación sobre la influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón (Calvet, 2014). Sobre dicha línea de investigación, que estudia los efectos de las temperaturas elevadas de las barras CRFP sobre la adherencia en edades tempranas del hormigón, profundizaremos para completar esos estudios a edades avanzadas, de hasta 180 días y en condiciones de temperatura elevadas.

Se trata pues, de un salto cuantitativo en la duración de las condiciones climáticas estudiadas hasta el momento, pasando de unas horas a más de seis meses en cámaras climáticas.

## **1.2 Objetivos**

Será esencial comprobar cómo se comportarán las barras de CRFP formando parte de hormigón armado sometido a altas temperaturas en tiempos prolongados, tales como 60 y 180 días. Concretamente, comprobar su adherencia en presencia de altas temperaturas en edades avanzadas, pues suponen la base teórica y normativa sobre el diseño de estructuras de hormigón armado; es decir, el adecuado comportamiento que hace de este material heterogéneo un elemento de capacidad portante predecible.

De igual modo, se analizará la influencia que la humedad puede tener, combinada con la temperatura, en el comportamiento adherente de las barras de CFRP en el hormigón.

Asimismo, será objetivo de la tesis correlacionar los resultados de las diferentes barras de CRFP con las del acero bajo las

condiciones estudiadas, para avanzar en el conocimiento teórico de su capacidad portante, y poder contribuir a mejorar el modelizado de su cálculo estructural.

### **1.3 Plan de Trabajo**

Así pues, el plan de trabajo a desarrollado para estudiar el comportamiento adherente entre las barras de CFRP y el hormigón en diferentes condiciones térmicas en el tiempo, se llevará a cabo mediante una serie de ensayos experimentales de pullout, que se realizarán a 28, 60 y 180 días y a condiciones térmicas de 20, 50 y 80 °C, tanto en barras de CFRP con tratamientos superficiales de arenado y corrugado, como en barras de acero corrugado.

Para comprobar la influencia se analizan de 3 muestras de cada tipo de barra en cada ensayo. Con ello, se estará en disposición de comprobar la evolución de la adherencia de las barras en el hormigón en edades avanzadas, previendo así sus posibilidades adherentes.

Para determinar la influencia de las altas temperaturas en el hormigón, se realizarán ensayos de rotura a compresión de probetas cúbicas de 100x100x100 mm de cada amasada realizada y a las mismas edades y temperaturas que las experimentadas en los ensayos de pullout. Con ello, podremos correlacionar los resultados obtenidos, pudiendo analizar de este modo cómo afecta a la adherencia de las barras de CFRP la resistencia a compresión del hormigón.

Como ensayos complementarios, en las barras de CFRP se realizarán ensayos de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía de fuerza atómica (AFM) de las muestras ensayadas a pullout.



---

## 1.4 Metodología

Se diseñan dos etapas de ensayos para conseguir alcanzar los objetivos señalados:

La primera etapa consta de los ensayos de pullout, mediante los que se calcula el comportamiento adherente entre los diferentes tratamientos superficiales de las barras de CFRP y el hormigón en distintas condiciones ambientales, concretamente a 20°C, 60°C y 80°C. Estas condiciones de temperaturas se mantendrán, en cada caso, durante 28, 60 y 180 días.

A la temperatura de 20 °C, considerada de control, se le añade el parámetro de la humedad, dado que las resinas que forman la matriz polimérica pueden ser susceptibles de ser afectadas por el contenido de agua, que se pretende comprobar el resultado en cada una de las tipologías de barras estudiadas.

En los ensayos experimentales, también se contemplan ensayos de pullout de comparación con armado de acero, con el fin de obtener una comparativa del comportamiento adherente entre los diferentes tratamientos superficiales de las barras de CFRP y acero.

En la segunda etapa, una vez concluidos los diferentes ensayos de pullout, se realizarán los ensayos complementarios de Microscopia óptica, SEM y AFM, para obtener así los datos necesarios para el análisis a nivel micromecánico del comportamiento adherente.



## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Introducción

El estudio del hormigón armado con barras formadas por Polímero Reforzado con Fibra de Carbono, en adelante FRP, ha sido enfocado desde múltiples puntos de vista, desde cómo afecta cada una de las características específicas de sus componentes, hasta el comportamiento conjunto ante determinadas condiciones.

Por ello, se plantea esta revisión bibliográfica siguiendo ese esquema, es decir, desde las propiedades de las barras de CFRP hasta el material compuesto por ellas y el hormigón.

Se comienza definiendo los tipos de barras formadas por composites de FRP más habituales que se utilizan como armado en el hormigón (Fig. 2.1). Estas son:

- AFRP.- Polímero Reforzado con Fibra de Aramida.
- CFRP.- Polímero Reforzado con Fibra de Carbono.
- GFRP.- Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio.



Fig. 2.1.- Muestra de barras FRP (Fte. <http://mguadagnini.staff.shef.ac.uk/frp/frp.php>)

El uso de estructuras reforzadas con estas barras de FRP llevan más de 15 años en servicio, sin presentar ningún tipo de problemas

estructurales (Rostasy, 1996). Sin embargo, todavía se debe profundizar en el conocimiento de los procesos de adherencia entre las barras y el hormigón.

Estos compuestos de FRP, denominados composites, se definen como un material sólido y estructuralmente heterogéneo, formado por dos o más componentes diferentes, con distintas propiedades físicas, químicas y mecánicas, que forman un nuevo material que, tomando las ventajas de cada uno, mejora las propiedades de ellos, consiguiendo unas cualidades imposibles de conseguir de manera individual.

Los composites de Polímeros Reforzados con Fibras (FRP) están constituidos por una matriz polimérica reforzada con fibras en una o ambas direcciones, que son las encargadas de aportar resistencia y rigidez a las matriz. Las cualidades finales del composite dependerán de las propiedades de la matriz, la fibra y su unión, esto es, la interfaz.

Cada elemento del composite tiene una función, siendo el que da sentido al material la fibra, responsable de soportar los esfuerzos a los que esté solicitado el elemento.

Pero para que ello ocurra, esto es, que las fibras consigan ser transmisoras de los esfuerzos será preciso que exista una matriz polimérica que actúe como aglomerante de las mismas, con las siguientes funciones (Hollaway, 1993):

- La principal, la función de transferir las tensiones a las que está sometido el elemento estructural a las fibras.
- Mantener las fibras en el lugar y dirección adecuada.
- Dotar a la barra de resistencia a corte transversal.
- Resistir las condiciones ambientales.

Por último, la Interfaz entre las fibras y la matriz polimérica, lugar donde se produce la transferencia de tensiones, es una zona de transición determinante, que debe garantizar la adherencia requerida, sea química o física (Hollaway, 1993). Esta transferencia de tensiones a las barras se produce por rasante en la interfaz fibra/matriz, por lo que la resistencia de la interfaz es la que controla el proceso de transferencia, con los condicionantes de rotura de fibra o de la matriz.

El caso concreto a estudiar son las barras de Fibras de Carbono Reforzadas con Polímero (CRFP), composite formado por una matriz de resina polimérica, de resina epoxídica o viniléster y, como refuerzo, fibras de carbono. El resultado es un material anisótropo, presentando diferentes propiedades en las dos direcciones principales (Gay et al., 2003; Gibson, 1994)

En los siguientes apartados se aborda el conocimiento actual acerca de la composición, tipología, propiedades y durabilidad de las barras de CRFP, para finalizar con el comportamiento del material que formará el elemento estructural, el hormigón armado con barras de CRFP.

## **2.2 Composición de las Barras de CFRP**

Como se ha descrito, las barras de CFRP se componen de una matriz polimérica y de unos refuerzos de fibra de carbono.

### **2.2.1 Matriz Polimérica**

Un polímero es una sustancia compuesta por macromoléculas, caracterizada por la retención múltiple de una o más especies de átomos, unidos entre sí en cantidad suficiente para que las propiedades resultantes no varíen por la variación de unidades monoméricas.

La polimerización es la reacción química producida con la adición de un catalizador que inicia el proceso. El período transcurrido desde el estado líquido hasta el sólido, denominado curado, depende de la temperatura aplicada en el proceso, denominándose tiempo de curado, (GangaRao et al., 2007) y que resulta determinante en las propiedades resultantes del composite.

Se pueden encontrar polímeros en estado sólido o líquido, denominando matriz polimérica al polímero curado; dichas matrices poliméricas se clasifican en dos categorías: Termoestables y termoplásticas, en función de su comportamiento ante la diferencia de temperaturas, encontrando los termoplásticos en forma sólida y los termoestables en forma líquida (Mallick, 1993).

Es objeto de esta tesis doctoral estudiar la incidencia de elevadas temperaturas en la adherencia de las barras CFRP con el hormigón, por lo que se va a analizar la influencia que el comportamiento de la matriz polimérica tiene frente a la variación de temperatura.

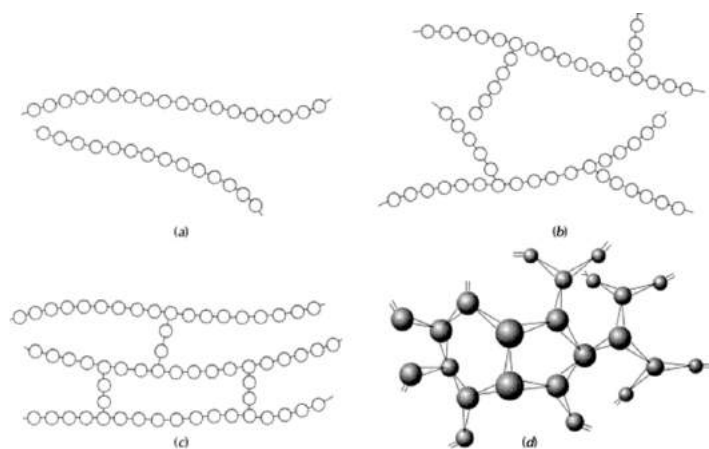


Fig. 2.2.- Representación esquemática de estructuras moleculares: Termoplástico (a) Lineal o (b) Ramificada) y Termoestable (c) Entrecruzada o (d) Reticulada. (Mallick, 1993).

El curado se ha mostrado como el proceso que determina en gran medida la estabilidad final del composite. Así, cada matriz polimérica se comporta de manera diferente durante el curado debido al enlace de las cadenas moleculares. En la Fig. 2.2 se presenta el esquema de las cadenas moleculares de los polímeros termoestables y termoplásticos (Callister, 1996).

Como anticipa su nomenclatura, los polímeros termoplásticos y termoestables se comportan de diferente modo respecto del calor y la tensión. Además, algunas matrices poliméricas termoestables se degradan a temperaturas moderadas al absorber humedad, pues son sensibles higrométricamente.

La presencia de humedad junto con elevadas temperaturas origina un reblandecimiento de la matriz polimérica, pasando de un comportamiento vítreo a uno plástico, con las consecuencias que ello conlleva. La importancia de este cambio es fundamental para la viabilidad del material como parte de un elemento estructural. La temperatura a la que se produce efecto se denomina transición vítrea,  $T_g$ , y como se apunta, disminuye con la humedad (Micelli, 2004).

Si el incremento de temperatura va más allá de la temperatura que origina la transición vítrea, la matriz polimérica iniciará un comportamiento plástico, con una sensible reducción en la resistencia a corte y la rigidez, esenciales para garantizar la inmovilización y correcta disposición de las fibras de carbono, por lo que el material composite dejará de ser útil para usos estructurales (Gibson, 1994).

Asimismo, la expansión debida a la absorción de humedad por la matriz polimérica produce el aumento de volumen del composite. Y lo contrario ocurre ante la reducción del contenido de humedad, provocando la retracción del material. Cada resina tiene, por tanto, unas propiedades que conllevan ventajas e inconvenientes a considerar, y que se resumen en la Tabla 2.1.

	Ventajas	Inconvenientes
<b>Resinas Termoeestables</b>	Buena resistencia a fluencia Buena resistencia química Temperatura máxima de uso elevada Propiedades mecánicas altas	Largo proceso de fabricación No permite el posformado
<b>Resinas Termoplásticas</b>	Corto proceso de fabricación Posformado Reciclado Gran tenacidad a fractura Buenas resistencia a deslaminación a fatiga	Baja resistencia a fluencia Propiedades mecánicas bajas Temperatura de uso máxima baja

Tabla 2.1. Comparativa de ventajas e inconvenientes de las resinas termoeestables y termoplásticas. (Elaboración propia, 2017)

La resina más utilizada en los composites destinados a uso estructural son las termoeestables, habitualmente la epoxi, y en menor medida las viniléster o poliéster. En la tabla 2.1 se presentan las propiedades físicas y mecánicas de características principales resinas poliméricas.

### Propiedades de las Resinas Termoeestables

Propiedades	Matriz		
	Poliéster	Epoxi	Viniléster
Densidad (kN/m³)	12,00-14,00	12,00-14,00	11,50-13,50
Resistencia a tracción (MPa)	34,5-104	55-130	73-81
Módulo de elasticidad (GPa)	2,1-3,45	2,75-4,10	3,0-3,5
Coefficiente de Poisson	0,35-0,39	0,38-0,40	0,36-0,39
Coefficiente de expansión térmica (10⁻⁶/°C)	55-100	45-65	50-75
Contenido de humedad (%)	0,15-0,60	0,08-0,15	0,14-0,30

### Propiedades de las Resinas Termoplásticas

Propiedades	Matriz		
	PEEK	PPS	PSUL
Densidad (kN/m³)	13,20	13,60	12,40
Resistencia a tracción (MPa)	100	82,7	70,3
Módulo de tracción (GPa)	3,24	3,30	2,48
Coefficiente de Poisson	0,40	0,37	0,37
Coefficiente de expansión térmica (10⁻⁶/°C)	47	49	56
Elongación (%)	50	5	75

Tabla 2.2.- Propiedades físicas y mecánicas de características principales Resinas Poliméricas. PEEK (Poliéter éter cetona), PPS (Polipropileno), PSUL (Polisulfona). (Elaboración propia, 2017).



### *2.2.1.1. Polímeros Termoplásticos*

La estructura molecular, linear o ramificada, de los polímeros termoplásticos no se encuentra interconectada con enlaces químicos, sino con débiles enlaces secundarios; esto hace que los polímeros termoplásticos son amorfos o semicristalinos.

Mediante procesos de calentamiento y enfriamiento, el polímero llega a degradarse hasta convertirlo en un material cada vez más frágil (CISPI, 1992).

Se observa un decrecimiento gradual en el volumen específico tras la solidificación del polímero termoplástico. La Transición vítrea de los polímeros termoplásticos depende del grado de cristalinidad, del peso molecular y de la tasa de enfriamiento. Se produce un decrecimiento repentino en el volumen específico cuando el polímero termoplástico cristalino solidifica y se enfría. El volumen específico disminuye si las cadenas moleculares del polímero (estructura semicristalina) se enlazan eficientemente (Calvet, 2014).

El grado de cristalinidad del material termoplástico afecta a la resistencia a tracción, pues ésta se incrementa cuando el grado de cristalinidad aumenta (Beck et al., 1963). Las propiedades mecánicas del polímero termoplástico se degradan tras los ciclos térmicos, aunque aumentando la dureza, la resistencia a impacto y la absorción de humedad.

Los métodos de fabricación dependen del tiempo de procesado de las resinas termoestables, mayor que el de las resinas termoplásticas. Tenemos los métodos de pultrusión o inyección (Fig. 3.3).

Debido al menor coste de producción con resinas termoplásticas, son estas las más utilizadas en el proceso de fabricación.

La relación de Polímeros Termoplásticos más utilizados es la siguiente:

- ABS: Polímeros de acrilonitrilo butadieno estireno
- ACETAL
- ACRÍLICOS
- PVC: Policloruro de vinilo
- PC: Policarbonato
- PE: Polietileno
- PP: Polopropileno
- PSU: Polisulfona
- PEEK: Poliéter éter cetona, que es el más empleado como matriz polimérica de resina termoplástica, por tener alta resistencia al impacto y baja absorción de agua, debido a su estructura semicristalina.

De este último polímero, destacaríamos su grado de cristalinidad depende de la velocidad a la que es enfriado desde su fusión, aumentando hasta rozar el 50% si este se produce lentamente. Por el contrario, un enfriamiento rápido provoca una estructura amorfa.

Es interesante apuntar que el refuerzo mediante fibras hace que aumente la cristalinidad, lo que provocará una mayor resistencia que las resinas epoxídicas. (Berglund, 1998).

### *2.2.1.2. Polímeros Termoestables*

Estos polímeros presentan una estructura del tipo reticular, entrecruzada, producida por el calor o por una combinación de calor y presión durante la reacción de polimerización, dando lugar a un material amorfo.

Estos polímeros termoestables se obtienen en forma de dos resinas líquidas. Una contiene los agentes de curado, y la otra materiales de relleno.

Con la mezcla de los dos componentes, se inicia la reacción de entrecruzado, por lo que los polímeros termoestables no pueden ser recalentados o refundidos, a diferencia de los termoplásticos.

Las ventajas de los polímeros termoestables para aplicaciones en ingeniería son:

- 1 - Alta estabilidad térmica.
- 2 - Alta rigidez.
- 3 - Alta estabilidad dimensional.
- 4 - Resistencia a la termofluencia y deformación bajo carga.
- 5 - Peso ligero.
- 6 - Altas propiedades de aislamiento eléctrico y térmico.

Por el contrario, además de no permitir ciclos térmicos agregados, tienen una limitada vida de almacenamiento y escaso alargamiento de rotura.

Con relación a la incorporación de fibras de refuerzo, su baja viscosidad permiten un gran volumen de inclusión, con un fácil y económico procesado.

Otro elemento importante a tener en cuenta en el uso de este polímero como matriz polimérica en su retracción tras el curado, yendo desde un máximo del 12% en el poliéster a un mínimo de 1% en la epoxi.

### *2.2.1.2.1 Resina Epoxi*

La resina epoxi se produce a partir de resinas líquidas orgánicas formadas por epóxidos (Penn et al., 1998), dando lugar a un polímero termoestable empleado en composites que logran gran capacidad mecánica y un excelente comportamiento frente a ambientes de corrosión, siendo su coste mayor que otras resinas (Bakis, 2002).

Las ventajas de las resinas epoxi en comparación con otras son:

- Elevada resistencia mecánica
- Excelente adhesión a variedad de fibras de refuerzo
- Baja retracción en curado
- Elevada resistencia química
- Buen comportamiento eléctrico

Son las resinas más utilizadas en los FRP por la adecuación de sus propiedades físicas y mecánicas, así como la variedad de condiciones de procesado en su fabricación. De hecho, las propiedades antes citadas son susceptibles de alteración modificando los reactivos, el catalizador o las condiciones de curado de la resina.

Como inconveniente, el ya mencionado elevado coste, además de su largo período de curado.

Con relación a la resistencia a la fluencia, los estudios realizados concluyen en que dicha resistencia dependerá fundamentalmente del tipo de epoxi (Sturgeon, 1978).

### 2.2.1.2.2 Resina de Poliéster

La matriz de poliéster se forma a partir de resina de poliéster insaturada, constituida por largas cadenas de moléculas poliméricas unidas por enlace químico o molecular (Mallick, 1988). De la densidad de estos enlaces moleculares dependerán las propiedades de la resina resultante, de modo que, si aumenta la distancia entre las moléculas poliméricas (algo que ocurre cuando aumenta la cantidad de estireno) se reducirá el límite elástico de la resina polimérica de poliéster.

Las propiedades de la resina de poliéster podrán ser moduladas para obtener mejores resistencia química, dureza y reducción de la fragilidad.

Estas resinas de poliéster, junto con las de viniléster, que veremos seguidamente, son las más utilizadas en las barras de GFRP.

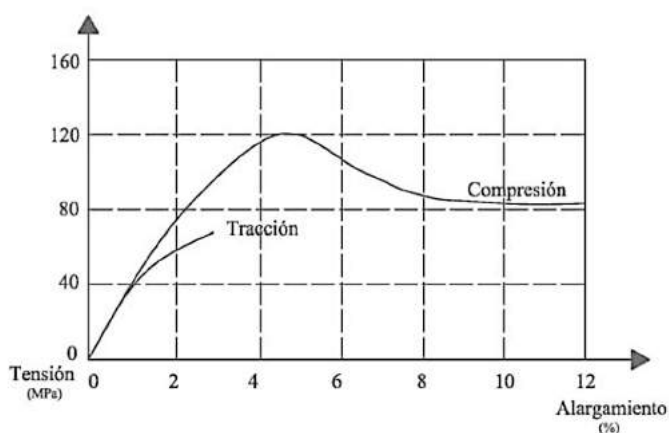


Fig. 2.3.- Gráfica de las curvas de Tensión/Deformación, frente a esfuerzos de tracción y compresión, de la resina de poliéster. (FIB Task Group 9.3, 2007).

Debido a que la resina de poliéster es un material viscoelástico, la relación tensión/deformación no es lineal (Fig. 2.3).

Las ventajas de esta resina como matriz de barras de CRFP son su bajo coste, resistencia química, baja viscosidad y tiempo de curado; y como inconvenientes destacar la elevada retracción, entre un 5% y un 12% y la baja resistencia a fatiga.

En cuanto a los efectos que producen los ambientes con abundante humedad, salinos y alcalinos, son determinantes para limitar su uso, pues a 60°C comienzan a perder masa por la rotura del polímero y posterior degradación de los productos solubles (Chin et al., 1997), llegando a perder toda la resistencia a tracción.

#### *2.2.1.2.3 Resina de Viniléster*

Se trata de una resina insaturada formada a partir de la reacción entre resinas epoxi y ácidos acrílicos o metacrílicos (Mallick, 1988). Estas resinas utilizan en el proceso de curado los mismos peróxidos orgánicos que las resinas de poliéster, pues facilitan el procesado, mejorando las resistencias química y a fractura (CISPI, 1992).

Debido a que la resina epoxi es el eje vertebrador de las resinas de viniléster, estas tienen un altas prestaciones mecánicas, químicas, de rigidez y de resiliencia; pero, al igual que las de poliéster, su gran retracción, entre 5% y 10%, es su mayor inconveniente.

### 2.2.2 Refuerzo de Fibra de Carbono

Una vez estudiadas las matrices poliméricas, veamos los refuerzos de fibra que conferirán a las barras las propiedades necesarias para su uso estructural.

La tipología de refuerzos sobre los que se desarrolla esta tesis es la de fibras de carbono, que formarán el composite y serán las

responsables de transmitir las tensiones aplicadas. Serán, por ello, la esencia de las barras CFRP.

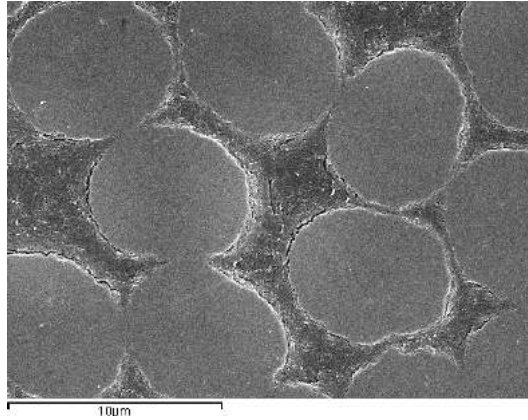


Fig. 2.4.- Imagen SEM de barra CFRP Arenada, donde se aprecian las fibras de carbono en la matriz polimérica (Imagen del autor, 2016).

Para que una fibra sea considerada de carbono debe contener más de un 90% de su masa de carbono. Denominaremos fibra de grafito a las que tengan un contenido de carbono superior al 95%.

La fibra de carbono se fabrica a partir de precursores. Los más utilizados son el poliacrilonitrilo (PAN) y la Brea (subproducto de la refinación del petróleo o del carbón de coque, denominado *Pich*). Estos precursores se obtienen en forma de hilos a los que se da un tratamiento superficial que le confiere las propiedades que se precisan.

El procesamiento de las fibras de carbono se divide en tres fases: Oxidación, carbonización y grafitación (Bakis, 1993). En la oxidación, las fibras se calientan a 400 °C, produciéndose el enlace de las cadenas moleculares de carbono. Posteriormente, la fase de carbonización, a 800 °C, sin oxígeno, elimina todas las impurezas no carbónicas, obteniendo fibras de carbono de alta resistencia a tracción pero bajo límite elástico. Finalmente, en la fase de grafitación, entre 1.000 °C y 3.000 °C, se producen estiramientos de las fibras de entre

un 50% y un 100% de su longitud, consiguiendo la orientación cristalina y un módulo de elasticidad alto (300 a 600 GPa). Se finaliza con un tratamiento superficial para mejorar la adherencia entre la fibra de carbono y la matriz polimérica (Mallick, 1988).

Tipo de Fibra		Densidad	Resistencia a tracción	Módulo de Young	Rotura por tracción	Coefficiente de expansión térmica	Coef. De Poisson
		KN/m³	Mpa	Gpa	%	10⁻⁴/°C	
GFRP	E-vidrio	25,00	3450	72,4	2,4	5	0,22
	S-vidrio	25,00	4580	85,5	3,3	2,9	0,22
	Vidrio resistente álcali	22,70	1800-3500	70-76	2,0-3,0	-	-
	ECR	26,20	3500	80,5	4,6	6	0,22
CFRP	Carbono (módulo alto)	19,50	2500-4000	350-650	0,5	-1,2...-0,1	0,20
	Carbono (alta resistencia)	17,50	3500	240	1,1	-0,6...-0,2	0,20
AFRP	Aramida (kevlar 29)	14,40	2760	62	4,4	-0,2 longitudinal 59 radial	0,35
	Aramida (kevlar 49)	14,40	3620	124	2,2	-0,2 longitudinal 59 radial	0,35
	Aramida (kevlar 149)	14,40	3450	175	1,4	-0,2 longitudinal 59 radial	0,35
	Aramida (Technora H)	13,90	3000	70	4,4	-6,0 longitudinal 59 radial	0,35
	Aramida (SVM)	14,30	3800-4200	130	3,5	-	-
BFRP	Basalto (Albarrie)	28,00	4840	89	3,1	8	-

Tabla 2.3.- Propiedades de las fibras de refuerzo de barras de FRP. (Suárez, F., 2011)

Como principal inconveniente de las fibras de carbono tenemos el precio, de 10 a 30 veces más caro que el E-Glass (Mallick, 1993).



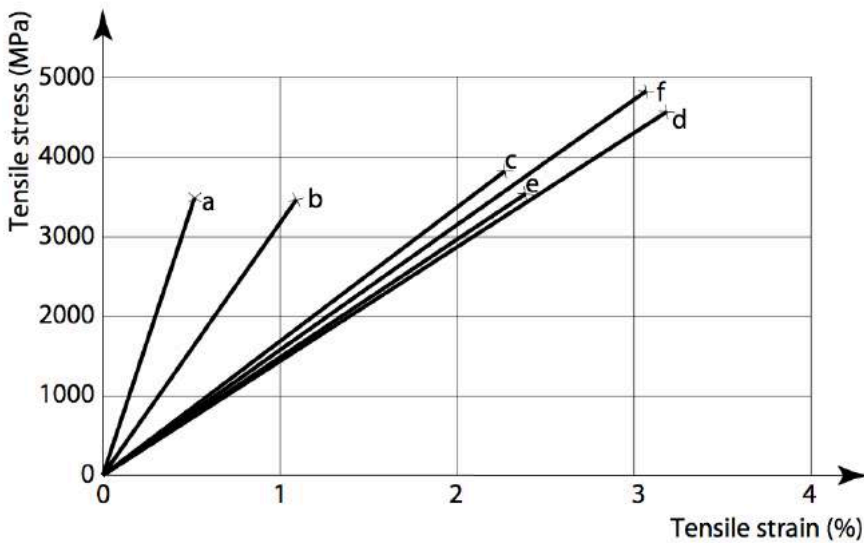


Fig. 2.5.- Gráfica Tensión/Deformación de fibras para barras de FRP. a) Carbono con alto módulo elástico, b) Carbono de alta resistencia, c) Aramida, d) S-Glass, e) E-Glass, f) basalto (FIB, 2007)

### 2.2.3 Proceso de Fabricación

Con las fibras de refuerzos embebidas en las resinas poliméricas se consiguen la barras de CFRP. Para ello, se introducen en el proceso de fabricación aditivos, que modificarán algunas propiedades, para conseguir las condiciones de curado, viscosidad, durabilidad, adherencia y resistencia deseadas.

Será durante el proceso de fabricación donde se definan las propiedades finales de las barras de CFRP, en función de las propiedades de las fibras, de la resina, de los aditivos, del porcentaje resina/fibra, tiempo de curado y las propiedades superficiales.

El principal modo de fabricación de las barras de CFRP es el de Pultrusión, teniendo variantes como pull-forming y pull-winding (Peters, 1998).

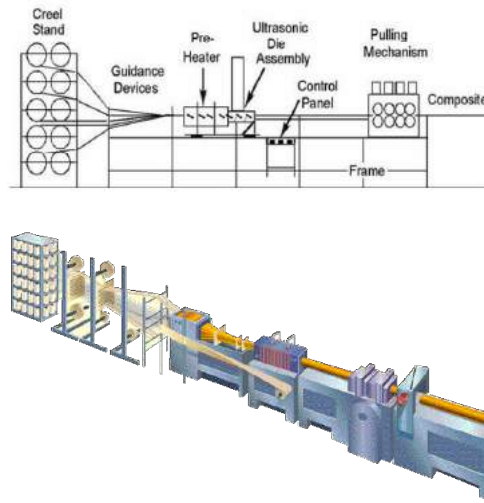


Fig. 2.6.- Proceso de fabricación por Pultrusion  
(<http://www.libertypultrusions.com/pultrusion-process/>, 2016)

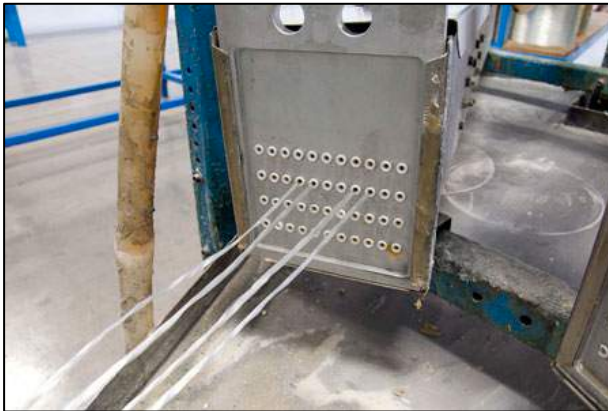


Fig. 2.7.- Proceso de fabricación de barras de FRP. (Marshall Composite Technologies, LLC)

El método de pultrusión consiste estirar las fibras de carbono, inicialmente enrolladas en bobinas, a través de unas guías; seguidamente se precalientan para eliminar el contenido de humedad de las mismas, se introducen en un baño de resina polimérica

(compuesto por resina polimérica, catalizador, fillers y aditivos para mejorar la trabajabilidad), se preforman configurando la superficie final), se cura con calor la resina, seguidamente el composite es estirado y cortado. (Paciornik et al., 2003; Suratno et al., 1998).

La superficie final tras la pultrusión suele ser lisa, por lo que se le aplican tratamientos superficiales para mejorar la adherencia. Estos son (Peters, 1998):

- Chorreado de arena: Una granulometría cuidadosamente seleccionada de arena, se adhiere a la barra de CFRP mediante una fina capa de resina polimérica).
- Banda de CFRP: Helicoidalmente adherida (una banda de CFRP es adherida helicoidalmente a la barra mediante resina polimérica).
- La Combinación de los dos tratamientos anteriores.

El método pull-forming es una variación por la que se pueden fabricar secciones curvas y rectas, pudiendo cambiar las dimensiones transversales del producto (Peters, 1998).

El proceso de fabricación pull-winding es análogo al método de pultrusión, introduciendo un zunchado (mediante fibras de refuerzo dispuestas transversal y helicoidalmente) sobre las fibras longitudinales, proporcionando una mayor resistencia transversal y de corte al composite (Peters, 1998).

Como veremos más adelante, la tipología del tratamiento superficial aplicado a las barras CFRP será determinante para sus capacidades mecánicas y adherentes formando parte del hormigón armado.

## 2.3 Tipo de Barras de CFRP

La utilización de barras de CFRP como armado del hormigón ha llevado a comparar con el acero de manera casi instintiva. Pero la realidad es que este material -o mejor, estos materiales, pues son muchas las variantes de sus componentes y fabricación- no son comparables a un material isótropo como es el acero. De hecho, no disponen de grados de resistencia y módulo, geometría superficial y diámetros de barras estandarizados. La falta de estandarización es debida a esa heterogeneidad intrínseca, a la dependencia de las características físicas, mecánicas y comportamiento a corto y largo plazo, del proceso de fabricación y composición de las barras de CFRP. Esto supone que las diferentes normativas de diseño de estructuras de hormigón armado con barras de CFRP (ACI 440.1R-06; JSCE 1997(b); CAN/CSA-S806-02; FIB Task Group 9.3, 2007; CNR-DT 203/2006; IStructE, 1999), no dispongan de valores estandarizados de las características de las barras de CFRP. Por lo tanto, los valores de las características mecánicas de las barras de CFRP (Resistencia a tracción, módulo elástico y alargamiento de rotura) serán proporcionados por cada fabricante de barras, de acuerdo con la normativa aplicable en dicho país.

### 2.3.1 Grados de Resistencia y Módulo

Como hemos visto, no existe una armonización de las características técnicas, sino que las distintas normativas establecen unos valores mínimos de resistencia a tracción y módulo elástico (ACI-440.1R-06; JSCE 1997(b); CNR-DT 203/2006).

La norma ACI-440.1R-06, establece grados a partir de una resistencia a tracción mínima de 414 MPa y un módulo elástico mínimo de 110,3 GPa (denominado E 110,3). A su vez, en un intento de estandarizar los armados de CFRP, desarrollan una clasificación de grado de resistencia a tracción. Esta comienza con un grado mínimo

F60 (presenta una resistencia a tracción mínima de 414 MPa), y finaliza con un grado F290. El paso de un grado inferior al contiguo superior se realiza mediante incrementos de 69 MPa:

- Grado F60:  $414 \text{ MPa} \leq f_{fu}^* < 483 \text{ MPa}$ .

- Grado F70:  $483 \text{ MPa} \leq f_{fu}^* < 552 \text{ MPa}$ .

- Grado F....

- Grado F290:  $1999 \text{ MPa} \leq f_{fu}^* < 2069 \text{ MPa}$ .

$f_{fu}^*$  es la resistencia a tracción garantizada de una barra de CFRP, definida como la resistencia media a tracción de una muestra frente al ensayo de tracción simple ( $f_{u,ave}$ ), menos tres veces la desviación ( $f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma$ ), en MPa.

La norma JSCE 1997(b), establece unos valores mínimos de resistencia a tracción y módulo elástico, dependientes del tipo de geometría superficial (CR y CD, donde CR son barras de CFRP lisas con tratamiento superficial, y CD son barras de CFRP deformadas), volumen de fibra (entre 50-65%) y diámetro (A y B, donde A:  $D \leq 20$  mm, B:  $D \geq 20$  mm) de las barras de CFRP.

PROPIEDADES	MATERIAL			
	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
Módulo longitudinal (GPa)	200	35 - 65	100 - 580	40 - 125
Resistencia a tracción longitudinal (MPa)	450 - 700	450 - 1600	600 - 3500	1000 - 2500
Deformación última %	5 - 20	1,2 - 3,7	0,5 - 1,7	1,9 - 4,4

Tabla 2.4.- Valores de resistencia a tracción y módulo elástico de barras FRP comparado con Acero (Suárez, F., 2011)

### 2.3.2 Geometría Superficial

Como se ha citado, las fibras que refuerzan estos composites son extremadamente resistentes a tracción, por lo que se precisa una

garantía en la adherencia de la barra con el hormigón, que traslade los esfuerzos necesarios para conseguir una tensión adherente de servicio al interior de la barra, a su núcleo, formado por esas fibras integradas en la matriz polimérica.

De ahí la importante función de la geometría superficial de este tipo de barras, cuya tipología superficial determinará las características adherentes de la barra.

En el mercado se encuentran multitud de soluciones para garantizar la adherencia, encontrando que se pueden agrupar en función del modo en que se desarrolla esa adherencia:

- Adherencia Química. Con barras arenadas, fundamentan su adherencia mediante procesos químicos y el posterior rozamiento de su superficie con la del hormigón.

- Anclaje Mecánico. Barras con corrugas o texturizado en superficie que provoca un anclaje en el seno del hormigón, siguiendo el esquema utilizado por las barras de acero corrugado.

Del mismo modo que se ha visto respecto a las características técnicas de las barras de CFRP, tampoco existe una estandarización en la geometría superficial. Esto provoca que el mercado sea quien propone las diferentes tipologías existentes.

En la Fig. 2.8 se observan diferentes recubrimientos superficiales con fibras de distinto origen.

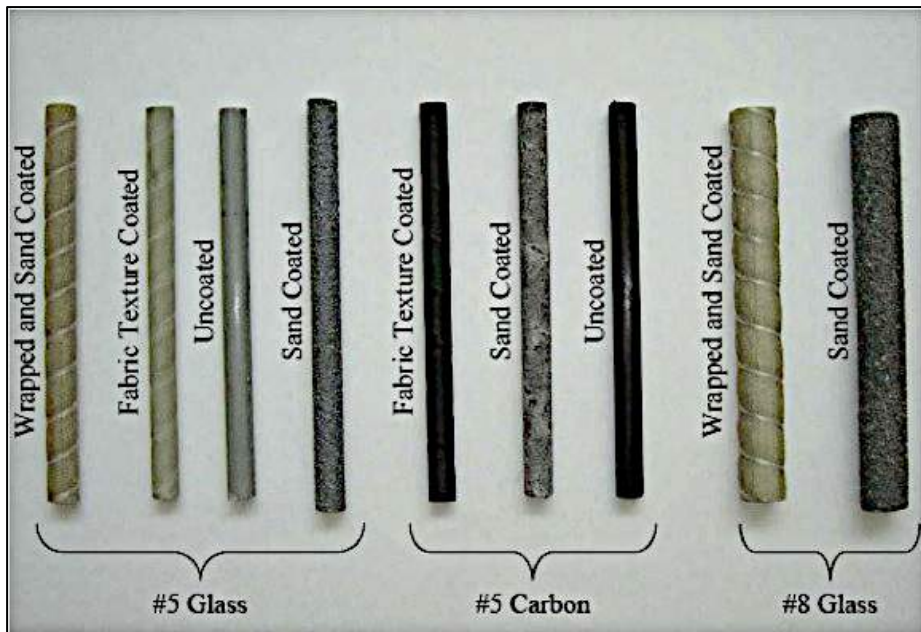


Fig. 2.8.- Tipos de geometrías superficiales de barras de CFRP. (Suárez, F., 2011)

### 2.3.3 Diámetro de las Barras

Con relación al diámetro de las barras, la norma ACI 440.1R-06 establece una clasificación similar a la norma ASTM para las barras de acero.

No se ha encontrado ninguna otra clasificación en el resto de normativa que contempla la utilización de barras de CFRP en el diseño de estructuras de hormigón armado.

### 2.3.4 Nomenclatura para la identificación de las barras de CFRP.

Tampoco en la manera de identificar las barras se ha armonizado un estándar. De forma resumida, se presentan las diferentes nomenclaturas por normativa:

#### ACI 440.1R-06

##### XXX-C#5-F200-E200

- XXX: Símbolo de identificación del fabricante de las barras.
- "C": Letra identificadora del tipo de fibra de refuerzo, seguido del número correspondiente al diámetro nominal de la barra (según la tabla 2.5).
- Grado de resistencia de la barra (por ejemplo, F200).
- Grado de módulo de elasticidad de la barra (por ejemplo, E200).
- Se añadirá la clasificación del grado de adherencia, cuando esta esté disponible.

#### JSCE 1997(b)

##### CR50A

- "C": Letra identificadora del tipo de fibra de refuerzo.
- Letra identificadora del tipo de geometría superficial de la barra de CFRP: "R" para barras lisas, o, lisas con recubrimiento superficial; "D" para barras deformadas.
- Número (50 o 65) que designa el porcentaje del contenido mínimo de fibra de refuerzo.
- Letra que identifica el diámetro de la barra: A y B, donde A:  $D \leq 20$  mm, B:  $D \geq 20$  mm.

## 2.4 Propiedades Físicas de las barras de CFRP

Para la evaluación de las propiedades de las barras de CFRP se debe conocer el volumen y la masa relativa de sus componentes, utilizando para su designación los subíndices  $c$  (composite),  $f$  (fibra) y  $m$  (matriz),  $v$  (volumen),  $V$  (volumen relativo),  $m$  (masa del composite) y  $M$  (masa relativa).



### 2.4.1 Densidad

La relación entre volumen y masa, su densidad, es aproximadamente la quinta parte de la de las barras de acero ( $7.850 \text{ Kg/m}^3$ ), según la tabla 2.5. Esta característica es una de las virtudes del material, pues supone una importante disminución del peso propio en la estructura, más facilidad de manipulación y menores coste de transporte.

Property	Matrix		
	Polyester	Epoxy	Vinyl ester
Density ( $\text{kg/m}^3$ )	1200 - 1400	1200 - 1400	1150 - 1350
Tensile strength (MPa)	34.5 - 104	55 - 130	73 - 81
Longitudinal modulus (GPa)	2.1 - 3.45	2.75 - 4.10	3.0 - 3.5
Poisson's coefficient	0.35 - 0.39	0.38 - 0.40	0.36 - 0.39
Thermal expansion coefficient ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	55 - 100	45 - 65	50 - 75
Moisture content (%)	0.15 - 0.60	0.08 - 0.15	0.14 - 0.30

Tabla 2.5.- Densidad de las barras de FRP, según FIB, 2007 (Boletín n° 40 FIB, 2007)

Para calcular la densidad de este material compuesto, debemos conocer densidades y volúmenes de matriz y fibras, que componen las barras de CFRP, cuya notación es “ $\rho_c$ ” (Ec. 2.1).

$$\rho_c = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m \quad (\text{Ec. 2.1})$$

### 2.4.2 Coeficiente de Expansión Térmica (CTE)

Las barras de CRFP son marcadamente anisótropas, lo que conlleva que se distinguirán dos coeficientes de expansión térmica: Uno según el eje longitudinal ( $\alpha_L$ ) dominado por las fibras de refuerzo, y otro en el sentido transversal ( $\alpha_T$ ) que dependerá de la matriz polimérica. Las ecuaciones 2.2 y 2.3 son las utilizadas para su cálculo.

$$\alpha_L = \frac{E_f L V_f \cdot \alpha_{fL} + E_m V_m \cdot \alpha_m}{E_f L V_f + E_m V_m}$$

(Ec. 2.2)

$$\alpha_T = V_f \cdot \alpha_{fT} + V_m \cdot \alpha_m + V_f \cdot \nu_{fLT}(\alpha_{fL} - \alpha_L) + V_m \cdot \nu_m(\alpha_m - \alpha_L)$$

Ec. 2.3)

Donde:  $\alpha_{fL}$ , es el CTE de las fibras en el eje longitudinal.  $\alpha_{fT}$ , es el CTE de las fibras en la dirección transversal.  $E_{fL}$ , es el módulo de las fibras en el eje longitudinal.  $E_m$ , es el módulo de la matriz polimérica.  $\nu_{fLT}$ , es el coeficiente de Poisson de las fibras en el eje longitudinal.

En la Tabla 2.6 se muestra el CTE de las barras de CFRP y varios FRP's con un volumen de fibras de 50-75%.

Direction	Coefficient of Thermal Expansion ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )				
	Steel	Stainless Steel	GFRP	CFRP	AFRP
Longitudinal, $\alpha_L$	11	10 to 16.5	6 to 10	-9 to 0	-2 to -6
Transverse, $\alpha_T$	11	10 to 16.5	21 to 23	74 to 104	60 to 80

Tabla 2.6.- Coeficientes de Expansión Térmica (CTE) de barras FRP (FIB, 2007)

Los valores negativos de CTE indican retracción que ocurre en el eje longitudinal con el aumento de temperatura (conlleva una expansión transversal), y lo contrario ocurre con disminución de temperatura, donde habrá un alargamiento en el eje longitudinal, sufriendo el eje transversal una contracción.

### 2.4.3 Conductividad Eléctrica.

El composite CRFP resulta también anisótropo en su comportamiento eléctrico, dado que las fibras de carbono son conductoras (sentido longitudinal) pero no así la matriz polimérica. De hecho, la matriz tiene la función de aislante eléctrico de las barras de CFRP, además de eliminar el magnetismo, lo que le confiere la posibilidad de utilización en estructuras que requieran dichas características.

## 2.5 Propiedades Mecánicas de las barras de CFRP.

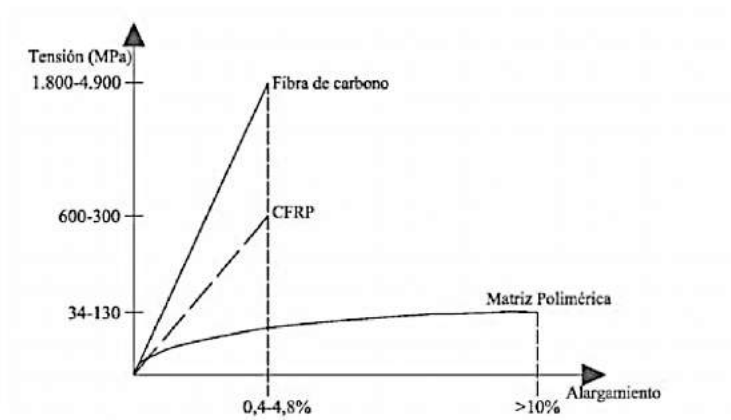


Fig. 2.9.- Gráfico Tensión/Deformación del composite CFRP y de sus componentes. (Calvet, 2014)

Debido a su marcado carácter anisótropo, las propiedades mecánicas en ambas direcciones serán muy diferentes, teniendo en el eje longitudinal un buen comportamiento, mientras que en el transversal será menor.

### 2.5.1 Tracción

Como se aprecia en el gráfico de la figura 2.9, las fibras tienen una elevadísima capacidad de resistencia a tracción (1.800 a 4.900

Mpa), pero de rotura frágil; mientras que la matriz polimérica, presenta muy baja resistencia, pero con deformaciones que superan el 10% de su longitud.

El Composite final, la barra de CFRP, condicionado por la elevada resistencia de la fibras, tiene un comportamiento elástico y lineal, sin deformación previa, hasta su rotura (ACI 440.1R-06; FIB Task Group 9.3, 2007). Ello siempre supone un riesgo a medir con precisión en las estructuras armadas con estos materiales, pues su rotura será frágil, sin aviso previo en forma de deformaciones.

En la figura 2.10. se presenta una comparativa del comportamiento a tracción de las distintas barras FRP y el acero. En ella se observa como las barras de CFRP desarrollan resistencias de tracción muy superiores a las del acero, hasta de 5 veces en CFRP con niveles volumen de fibras de carbono entre 50% y 70%.

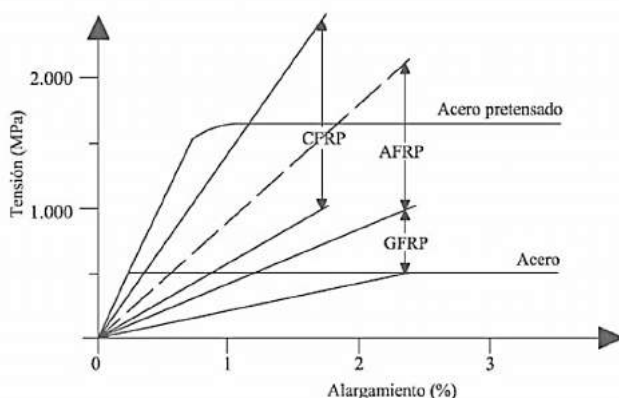


Fig. 2.10.- Comparativa Tensión/Deformación de diferentes barras FRP y con el acero (Calvet, 2014)

Para calibrar adecuadamente la resistencia de servicio, se debe determinar el módulo elástico de las barras CFRP, que dependerá del tipo de refuerzo de fibra de carbono agregado al composite.

Una clasificación para el módulo elástico sería la siguiente:

- a) Fibras de Carbono de alto módulo (350-650 GPa)
- b) Fibras de Carbono de alta resistencia (120-580 GPa)

Esa rotura frágil de las barras de CFRP se concreta en un alargamiento de rotura muy bajo, en el entorno del 0,5% a 1,7% (ACI 440.1R-06; FB Task Group 9.3, 2007). En la tabla 2.7 se presentan los valores relacionados en la figura 2.10.

Propiedades/Armado	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
Limite elástico (MPa)	276-517	-	-	-
Resistencia a tracción (MPa)	483-690	483-1.600	600-3.690	1.720-2.540
Módulo elástico (GPa)	200	35,0-51,0	120-580	41,0-125
Alargamiento elástico (%)	0,14-0,25	-	-	-
Alargamiento de rotura (%)	6,0-12,0	1,2-3,1	0,5-1,7	1,9-4,4

Tabla 2.7.- Propiedades mecánicas a tracción de barras FRP y acero (Calvet, 2014).

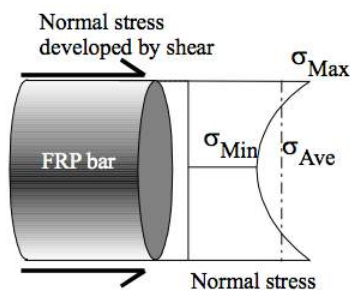


Fig. 2.11.- Distribución de las tensiones normales en una sección transversal de la barra FRP (Achillides, et al., 2004)

A diferencia del acero, en que el diámetro de la barra no tiene demasiada incidencia en la resistencia a tracción de la misma, en la

barras de CFRP, debido a su carácter anisótropo, se produce una reducción de las resistencias a mayores diámetros, debido al diferente comportamiento de las fibras del alma y de la superficie, provocando una distribución no uniforme de las tensiones en la sección transversal (Achillides et al., 2004). Este efecto se presenta grafado en la figura 2.11.

En la figura 2.12 se refleja el impacto que tiene sobre una barra de CFRP la inclinación de la carga sobre el eje longitudinal. La resistencia a tracción y la rigidez variará dependiendo de la dirección de las tensiones aplicadas, disminuyendo de manera muy acusada (Rostasy, 1996) cuando se aplica la tensión con un ángulo,  $\theta$ , superior a  $15^\circ$  (FIB Task Group 9.3, 2007; Peters, 1998).

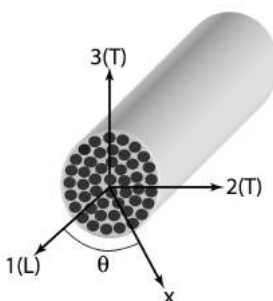


Fig. 2.12.- Influencia de dirección de la tensión aplicada en las barras de CFRP (FIB, 2007).

## 2.5.2 Compresión

La resistencia a compresión en las barras de CFRP supone un 78% de la de tracción (Mallick K. , 1988). Aun con ello, las normativas de diseño de estructuras no recomiendan su empleo en elementos estructurales solicitados a compresión axial (ACI 440.1R-06; JSCE 1997(b); CAN/CSA-S806-02; FIB Task Group 9.3, 2007; CNR-DT 203/2006; IStructE, 1999).

Esto es debido a la complejidad y diferentes modos de rotura que presentan las barras sometidas a compresión axial, pues se produce por rotura a compresión de la matriz polimérica, inducida por el micropandeo (*microbuckling*) de las fibras. Ello hace que la resistencia real de las barras de CFRP a compresión dependa del tipo de matriz polimérica, de las fibras de carbono y, sobre todo, del porcentaje de volumen (FIB Task Group 9.3, 2007; Yuan et al., 2001). Si se supera el 40% de volumen de fibras, el modo de rotura pasa a ser a cortante, es decir, por doblado de las barras al sufrir la compresión axial (*kinking*).

Al igual que a tracción, el comportamiento frente a compresión axial de las barras de CFRP es elástico hasta su rotura (Yuan et al., 2001).

### 2.5.3 Cortante

Como se ha expuesto anteriormente, la dirección transversal de las barras de CFRP está condicionada por las propiedades de la matriz polimérica. Con relación a la resistencia a cortante de la barra, no existen ensayos normalizados y es cada fabricante quien la determina, especificando el ensayo utilizado para determinarlo (ACI 440.6M-08, 2009). La resistencia a corte de las barras de CFRP se estima superior a 120 MPa (Fortec Stabilization, Inc., 2010).

Se estima que el modo de rotura de las barras de CFRP a cortante es debido al *splitting* de la matriz polimérica, sin llegar a seccionarse las fibras de carbono. Así, las fibras de carbono se desplazan en dentro de la matriz polimérica a modo de inclusiones que concentran las tensiones de manera puntual en la zona solicitada. Tampoco aquí encontramos modelos teóricos desarrollados para calcular la resistencia a cortante, de modo que se puede aproximar concluyendo que la resistencia a corte de la barra será similar a la que presente la matriz polimérica (Barbero, 1999).

Para conseguir mejorar el comportamiento a cortante de las barras, los fabricantes incorporan un zunchado, mediante la técnica descrita del *pull-winding*, o la disposición de fibras de carbono en ambas direcciones (ACI 440.1R-06 , 2007).

## 2.6 Durabilidad de las Barras de CFRP

En el contexto de la investigación de esta tesis, se debe prestar atención especial a todo lo relacionado con los condicionantes de durabilidad que afectan a las barras de CFRP.

Debido a que este material está llamado a ser uno de los sustitutos del acero en las estructuras de hormigón armado, precisamente por las ventajas frente a este en aspectos como la durabilidad de los elementos estructurales, se analiza cómo se comportan sus propiedades mecánicas frente a las distintas condiciones ambientales.

La respuesta del composite a las condiciones ambientales dependerá de (GangaRao H. N., 2007):

- Tipo de fibra de carbono
- Tipo de resina polimérica
- Interfaz fibra-matriz
- Condiciones de curado
- Control de calidad fabricación
- Nivel agresividad ambiental.

Para mejorar las condiciones frente a exposición ambiental se introducen aditivos a la resina polimérica (Gangarao, 1997; Kato et al., 1998).



---

Las condiciones ambientales a las que está expuesta una estructura de hormigón armado afectan a la durabilidad de las barras de CFRP en varios aspectos, como son:

- Resistencia
- Rigidez
- Interacción fibra/matriz
- Micro fisuración
- Macro fisuración

Y los fenómenos ambientales a estudiar serán (GangaRao S. V., 1997; GangaRao H. N., 2007; GangaRao H. N., 2007):

- Agua dulce y salada
- Soluciones químicas (salinas, alcalinas y ácidas)
- Frío prolongado
- Temperaturas elevadas y prolongadas
- Gradiente térmico a lo largo de la barra
- Oxidación
- Radiación Ultra Violeta
- Envejecimiento
- Fuego

La durabilidad de las barras de CFRP también se ve influenciada por los enlaces químicos entre las cadenas poliméricas, las fuerzas covalentes y de van der Waals y el estado físico del composite (morfología, tamaño y orientación de la fibra); el envejecimiento y la degradación estructural suele darse entre la

sustancia predominante en el ambiente y la estructura polimérica (Calvet, 2014).

Se estima que el envejecimiento de las barras de CFRP puede llegar a partir de los 75 años. (Vijay et al., 1999).

En cuanto a la temperatura, que se abordará detalladamente, el envejecimiento físico se debe a la reagrupación de las macromoléculas que se da a temperaturas inferiores a  $T_g$ , la de transición vítrea.

### 2.6.1 Efecto de la Temperatura

Diversos autores han investigado los efectos de la temperatura sobre las barras de CFRP, concluyendo que modifica sus propiedades mecánicas y absorción de humedad (Allred, 1984; Devalapura et al., 1998; Katz et al., 1998, 1999; Pritchard et al., 1998; Taly et al., 2001; Hamad R. J. et al., 2017).

Como se ha mencionado,  $T_g$  es la denominada Temperatura de Transición Vítrea, que es la temperatura a partir de la cual la matriz polimérica comienza a perder su rigidez, que conlleva una reducción del módulo elástico. Lo que determina el valor de la  $T_g$  es el tipo de matriz polimérica, pues las fibras de refuerzo de carbono presentan una elevada resistencia frente a las altas temperaturas (Bootle et al., 2001).

En la exposición a temperaturas muy altas, por encima de los 250 °C, se ha observado una reducción del entorno del 20% de la resistencia a Tracción inicial de las barras de CFRP y GFRP (Kumahara et al., 1993). Asimismo, se han constatado reducciones considerables en otras propiedades, como la Flexión o el Cortante, debido a la transferencia de las tensiones desde las fibras de carbono a la matriz polimérica cuando la temperatura se acerca a  $T_g$  (Wang et al., 1995).

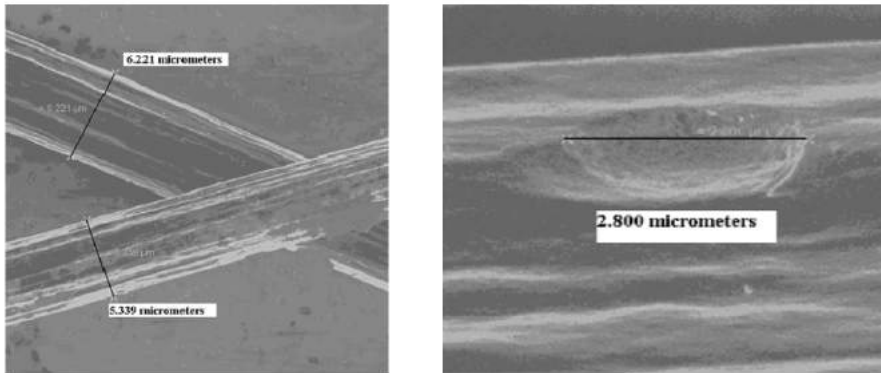


Fig. 2.13.- Reducción de diámetro y picado en superficie de fibra de carbono después de la exposición a 600 °C durante dos horas (Feih, 2009)

Los efectos que se aprecian en la figura 2.13 no se producen por debajo de los 450 °C (Feih, 2009), siendo además, no lineal el deterioro que sufre la fibra de carbono, tal como se aprecia en la figura 2.14.

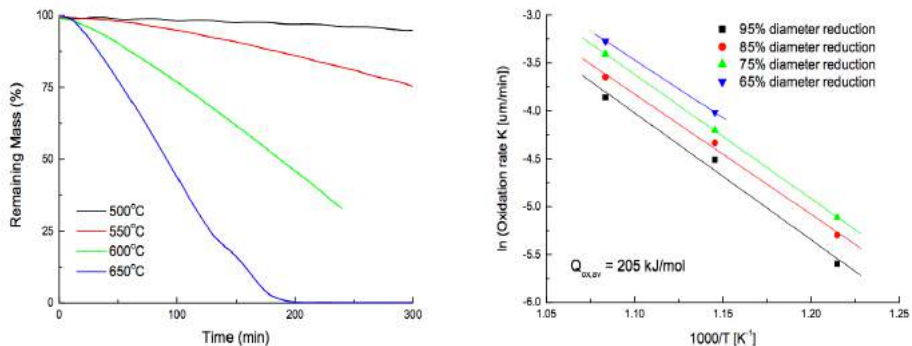


Fig. 2.14.- Pérdida de masa para las fibras de carbono a alta temperatura (Feih, 2009)

Resulta determinante, por tanto, establecer cuál debe ser la Temperatura máxima a la que estará expuesto el elemento estructural que contenga barras de CFRP, y relacionarla con la T<sub>g</sub>, debiendo esta tener un margen de seguridad de 30 ° C sobre la de servicio (Kóllar, 2003); Springer et al., 2003).

Specimen type	Diameter (mm)	Test temperature	Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Modulus (N/mm <sup>2</sup> )
Carbon fibre	9.5	20	1260	121.41
		20	1280	126.50
		100	993.21	105.10
		100	1283.62	132.73
		200	702.79	107.51
		200	763.05	107.27
		400	371.73	N/A
		400	387.70	N/A
		600	132.86	44.68
		600	9.44	N/A

Tabla 2.8.- Resultados de ensayos de resistencia a tracción a diferentes temperaturas en barras de CFRP. (Wang et al., 2007)

Con relación a las curvas Tensión/Deformación que desarrollan las barras de FRP, en la Fig. 2.15 se aprecia cómo se ven afectadas por la influencia de las elevadas temperaturas.

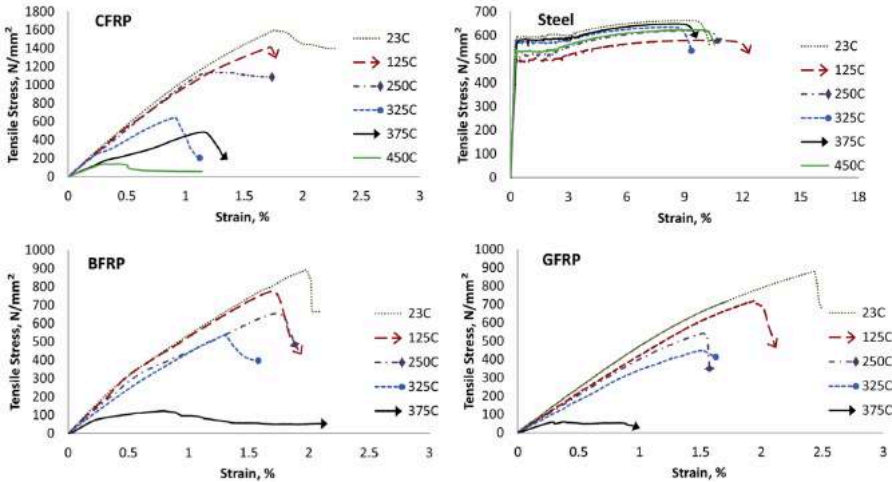


Fig. 2.15.- Típicas curvas tensión-deformación de diferentes barras a diferentes temperaturas (Hamad R. J., 2017)

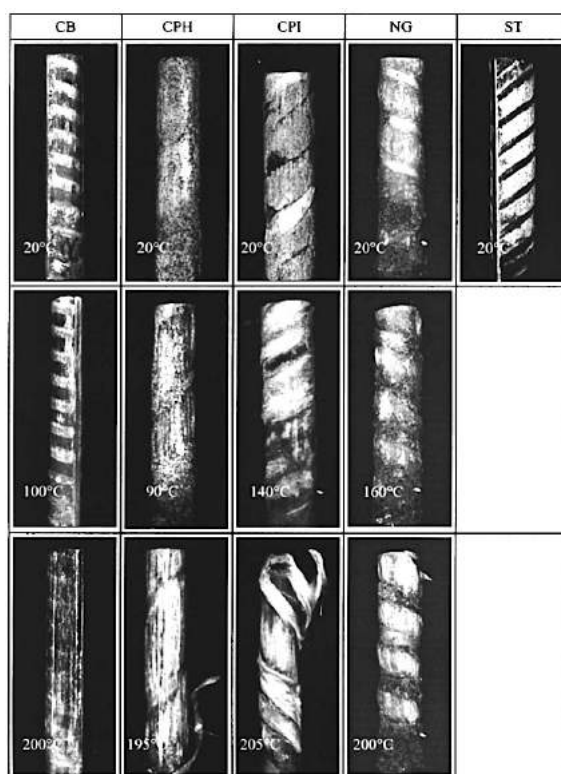


Fig. 2.16.- Imágenes de barras FRP después de ensayos Pull out en diferentes temperaturas (Katz et al., 1999)

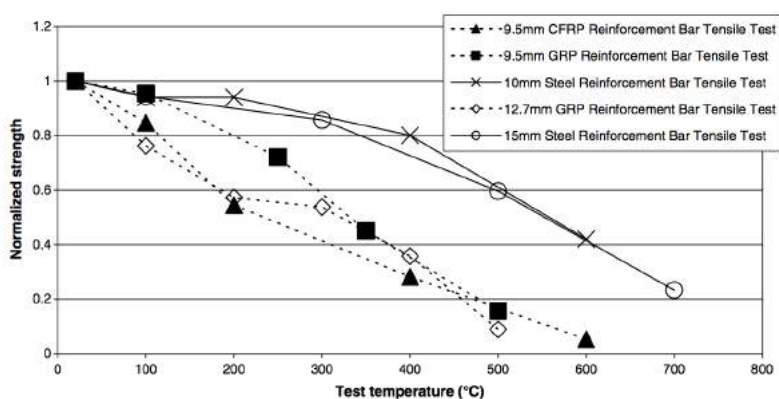


Fig. 2.17.- Comparación de la resistencia a la tracción en función de la temperatura para FPR y barras de acero (Wang et al., 2007).

Con relación al deslizamiento y módulo de elasticidad residual, las Fig. 2.18 y 2.19 aportan datos sobre la evolución de las barras de FRP bajo condiciones ambiente y altas temperatura.

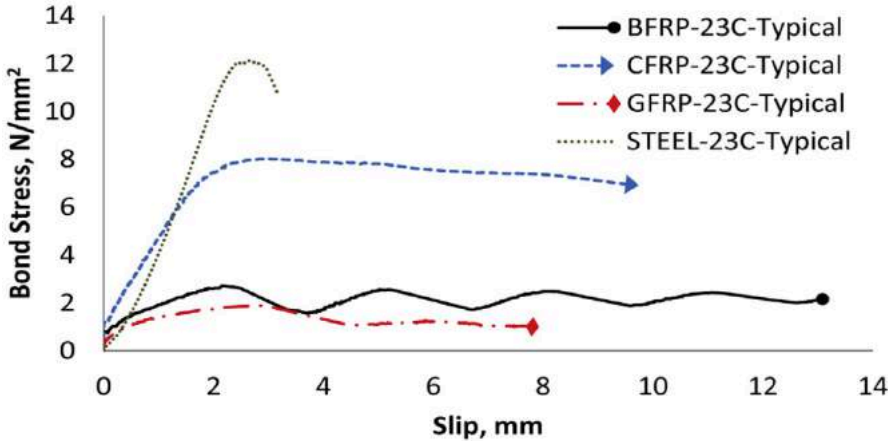


Fig. 2.18.- Curvas típicas de deslizamiento en ensayos de adherencia de FRP y barras de acero a temperatura ambiente.

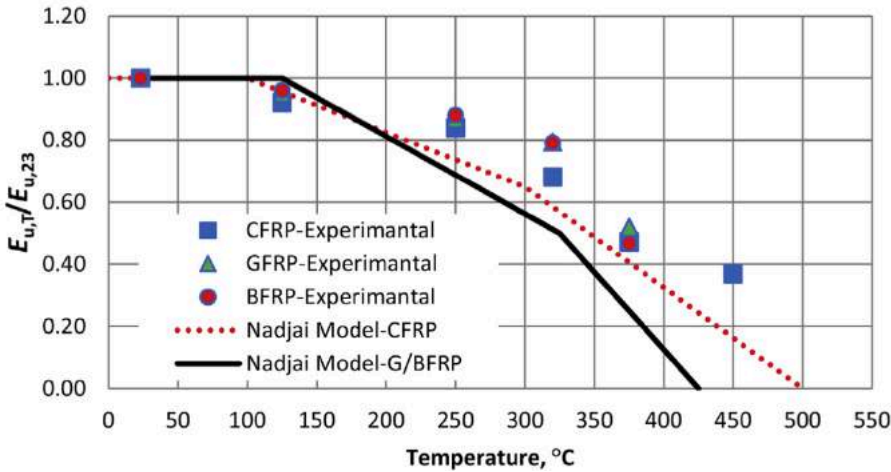


Fig. 2.19.- Módulo de elasticidad residual para barras FRP bajo temperaturas elevadas.

Es interesante observar estos resultados en la evolución de las barras de CFRP, objeto de esta investigación, en el rango 0 a 100 °C; se aprecia la nula influencia de estas temperaturas en el comportamiento de módulo y tensión de las barras de CFRP. Como se constatará a lo largo de este trabajo, este análisis se verá refutado en el caso de las barras de CFRP Corrugadas, confirmándose en las barras de CFRP Arenadas

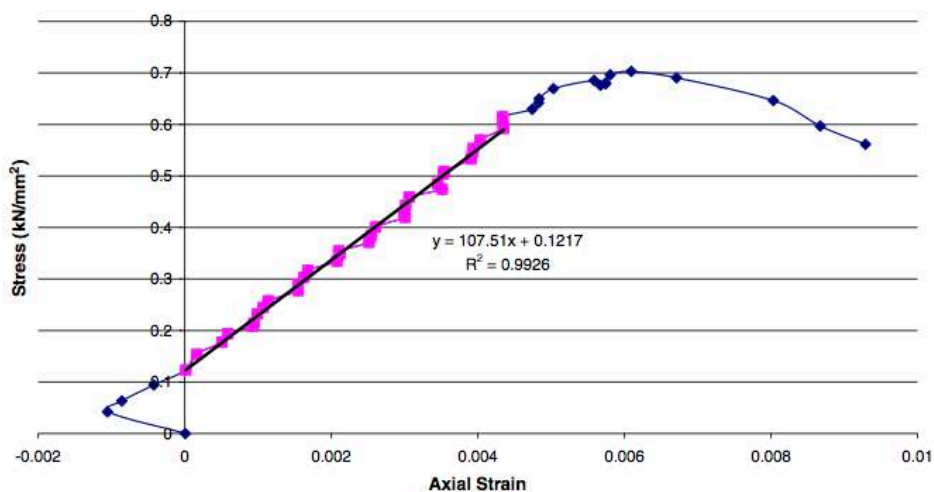


Fig. 2.20.- Relación tensión-deformación de la barra CFRP a 200 ° C (Wang et al., 2007).

En una investigación de Wang et al., (2007) sobre diferentes tipos de barras FRP y Temperaturas para determinar la incidencia en Resistencia a Tracción y su módulo elástico, llega a la conclusión de que la temperatura crítica de uso se sitúa en el entorno de los 350 °C. En la figura 2.21, se reflejan los resultados obtenidos:

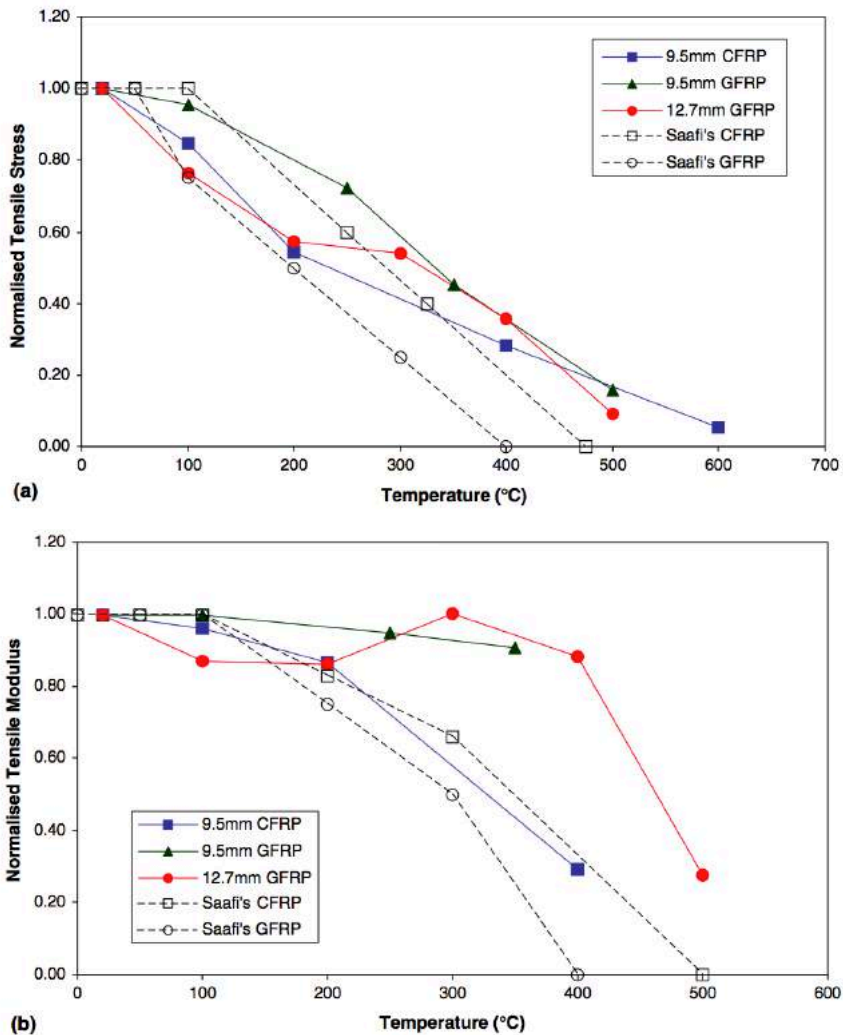


Fig. 2.21.- Comparación de la resistencia a la tracción y el módulo elástico para barras de FRP con predicciones de Saafi: (a) resistencia a la tracción normalizada a temperaturas crecientes, (b) módulo de tracción normalizado a temperaturas crecientes (Wang et al., 2007).

Así pues, se concluye con que las temperaturas elevadas afectan severamente a la resina de la matriz polimérica, debiéndose acotar en qué rangos de temperatura sucede, y con qué intensidad, cuidando muy especialmente que estas temperaturas cuenten con un



coeficiente de seguridad que las aleje de la temperatura de transición vítrea.

## 2.6.2 Efecto del Agua

Dada la alteración que puede sufrir la matriz polimérica por la presencia de agua, se analizan seguidamente sus consecuencias.

El agua penetra en el composite de dos formas (Parkyn, 1985; Rao, 1981):

- Difusión a través de la matriz polimérica. En este caso no llega a penetrar en forma líquida, sino que las moléculas del agua interactúan con los enlaces de hidrógeno del polímero.
- Difusión por grietas o poros en superficie de la barra. Es el caso en que la penetración del agua se produce por capilaridad.

La consecuencia de penetración de agua en la matriz polimérica es el ablandamiento por hidrólisis, reduciendo las propiedades de las barras CFRP, afectando a la resistencia a cortante, Tg y rigidez. Especial interés tiene para la investigación de esta tesis, la combinación de presencia de agua y altas temperaturas que han demostrado una aceleración en la pérdida de estas propiedades, en más de un 60% sobre las condiciones ambientales normales (Chateauminois et al., 1993).

Dada la diferencia de reacción al agua de las diferentes resinas, que se describe en el apartado 2.1.2, explica que los ensayos realizados sobre barras de CFRP con resinas termoestables, con baja absorción de humedad, no producen pérdida de resistencia considerable en edades máximas de un (1) año en presencia de aguas y a temperaturas entre 20 °C y 70 °C (Arockiasamy et al., 1996; Micelli, 2004; Nanni, 2001; Porter, 1997; Rahman AH, 1998; Tannous et al., 1998).

### 2.6.3 Efecto de los cloruros

Se ha probado mediante ensayos que la exposición de barras de CFRP a concentración de cloruros de hasta un 4% y temperaturas entre 20 °C y 70 °C no presenta disminución significativa en las propiedades mecánicas de las barras de CRFP, pero no así en las de GFRP y AFRP, dónde la reducción de resistencia y rigidez es aproximadamente del 50% (Saadatmanesh et al., 1999; (Sasaki I, 1997; GangaRao, et al. 1997; Steckel, et al., 1998; Rahman et al., 1998; Toutanji et al., 1998).

### 2.6.4 Efecto de los álcalis

La barras de CFRP tienen una buena resistencia a los álcalis. Las reducciones de resistencias a tracción y a corte suponen menos de un 4% (Davalos et al., 2008). Así lo afirma también la normativa de diseño de estructuras de hormigón armado con FRP, FIN Task Group 9.3, 2007, que, expresamente, dice que no muestran una disminución significativa.

### 2.6.5 Efecto de la Radiación Ultravioleta

En este caso, el riesgo se limita al acopio y almacenamiento de las barras, pues una vez confinado en el hormigón, no tiene incidencia.

Estudios sobre la exposición a rayos ultravioleta y humedad concluyen que la pérdida de resistencia a tracción puede llegar al 20% (Sasaki et al., 1997).

## 2.6.6 Efecto de la Carbonatación del Hormigón

La carbonatación, que es uno de los fenómenos que más impacto tienen en durabilidad de una estructura de hormigón armado con barras de acero, no tiene efectos negativos con el uso de las barras de CFRP, debido a que la reducción de pH que lleva consigo el proceso de carbonatación, contribuye a alargar la vida de servicio, mejorando la durabilidad (Katz A. B., 2000) (Sheard et al., 1997).

Habría que precisar que esta afirmación es aplicable a las barras de CFRP constituidas por matriz polimérica con buen comportamiento frente a la humedad, que en caso de carbonatación del hormigón, podría llegar a la superficie de las barras.

## 2.6.7 Comportamiento de las barras de CFRP a Largo Plazo.

La vida útil de las estructuras de hormigón armado con fibras de CFRP es una de las características que hacen recomendable su uso, por lo que es preciso abordar el modo en que la Fatiga, la Relajación y la Fluencia afectará a su comportamiento a largo plazo. Y, de nuevo, el carácter anisótropo y heterogéneo del composite hace que sus propiedades se vean modificadas en mayor o menor medida en función de la naturaleza del tipo de fibras de carbono, de su matriz polimérica, la interfaz entre fibra y matriz, las condiciones de curado o su proceso de fabricación (FIB, 2007).

### 2.6.7.1. *Comportamiento a Fatiga*

Se trata de analizar como responde el composite a un gran número de ciclos de carga. La resistencia a la fatiga de las barras de CFRP está condicionada por el régimen de carga, el tipo de tensiones, las cargas históricas, las condiciones ambientales y las propiedades del material (ACI 215R-74, revisión 1992).

Este tipo de sollicitación produce una degradación de la barra de CFRP que es resultado de la fisuración de la matriz polimérica, la rotura de las fibras de carbono y/o la deslaminación del composite (Schaff, 2001). En cualquier caso, el comportamiento sigue siendo lineal hasta la rotura por fatiga (Hollaway, 1993), sin presentar deformación previa, por suponer una rotura frágil debida a splitting longitudinal y daños en la matriz polimérica.

#### *2.6.7.2. Comportamiento a Relajación*

La relajación puede definirse como la disminución de la tensión resistente que experimenta un elemento estructural ante un alargamiento permanente, la edad o la temperatura.

Esta pérdida de resistencia se cuantificó por diversas investigaciones en el entorno del 1% al 3% para un período de 50 años (Ando, 1997; Balazs et al., 2001), lo que supone un buen comportamiento ante el efecto de relajación (cosa que no ocurre con las barras de AFRP y GFRP, con valores muy superiores).

#### *2.6.7.3. Comportamiento a Fluencia*

La deformación progresiva de un material en función del tiempo, bajo carga permanente (Ferry, 1980) es el fenómeno denominado Fluencia. Por ello, deberemos conocer los valores máximos de ese alargamiento y la resistencia máxima a tracción que podrá soportar bajo esa carga permanente. Al período máximo hasta la rotura por fluencia se le denomina “*Límite de Endurecimiento*”.

Este límite disminuye cuando aumenta la relación entre carga permanente y resistencia a corto plazo (ACI 440.1R-06; FIB, 2007).

Con relación a las posibilidades de que se produzca rotura por fluencia, se considera que para ello, la tensión permanente debe ser mayor que el 60% de la resistencia a corto plazo (Budelman et al., 1993), lo cual no es habitual en condiciones de servicio de una estructura de hormigón armado con CFRP.

Las investigaciones realizadas han determinado unas resistencias mayores al 85 % de la resistencia inicial a tracción para de las barras ensayadas un período de 100 años (Tokyo Rope, 2000); asimismo, el alargamiento máximo bajo tensión del 80% de la resistencia de tracción de las barras, ha sido menor al 0,01 % (Gerritse, 1993; Machida, 1993; Piggot, 1980; Saadatmanesh et al., 1999a,b). Por todo lo cual, se puede concluir con que las barras de CFRP tiene un buen comportamiento ante la fluencia.

## **2.7 Adherencia de las Barras CFRP con el Hormigón**

Una vez analizadas las principales características de las barras de CFRP, se revisará cuál es su comportamiento al actuar como armado en un elemento estructural de hormigón. Será determinante estudiar cómo se transmiten las tensiones entre las barras y el hormigón, analizar de qué manera se desarrolla la adherencia y sus tipos.

El comportamiento estructural frente a compresión, cortante y tracción dependerá, además de las propiedades de las barras CFRP y del hormigón, de la adecuada adherencia entre el hormigón y la barra; y especialmente en su respuesta a esfuerzos de flexión, en los que la respuesta ya no sólo depende de la resistencia específica ante estas tensiones, sino de la capacidad adherente y la compatibilidad de los alargamientos de estos dos materiales tan diferentes entre sí, como son el hormigón y las barras de CFRP.

Se entiende por adherencia entre barras de CFRP y hormigón la interacción entre ambos elementos mediante la que se produce la transferencia de tensiones del hormigón al armado, en la suposición de que hay compatibilidad de alargamientos; esto es, sin producirse deslizamientos entre ambos materiales.

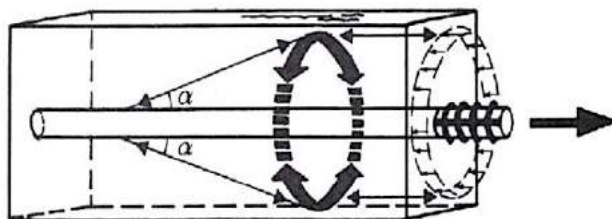


Fig. 2.22.- Fuerzas de adherencia equilibradas por anillo de tracción, Tepfers (1973)

Dada la complejidad del material hormigón armado con barras de CFRP y su respuesta a las tensiones generadas por las fuerzas axiales, resulta imprescindible evaluar en cada instante lo que ocurre en la interfaz de contacto.

Para determinar el comportamiento adherente del hormigón armado con barras de CFRP se utiliza el de “Pullout”<sup>1</sup>, según recomiendan las diferentes normativas de diseño estructural con barras FRP (ACI 440.1R-06, JSCE 1997(b), CAN/CSA-S806-02, CNR- DT 203/2006).

Mediante el ensayo de pullout, se busca recabar datos acerca del comportamiento adherente de la barra al ser traccionada, de modo que sea posible analizar lo que ocurre desde el inicio de entrada en carga hasta la rotura.

En este ensayo se parte de algunas premisas, como que se garantice el confinamiento del hormigón, evitando la rotura por

<sup>1</sup> Debido a la dificultad para traducir vocablos sajones de modos de rotura al castellano la denominación pullout no ha sido traducida, siendo una aproximación a su significado el término “estiramiento”.

<sup>2</sup> Fernando Gos-Gómez Llorca, Departamento de Construcciones Arquitectónicas  
En producción interna de la Universidad Politécnica de Valencia

“splitting”<sup>2</sup>, para lo que se dimensiona una probeta cúbica de 200 mm, según ACI.440.3R-12 (Fig. 2.19) , fijando una longitud adherente de 5 diámetros de la barras. Esta normativa, prevé una dirección de hormigonado perpendicular al eje longitudinal de la barra.

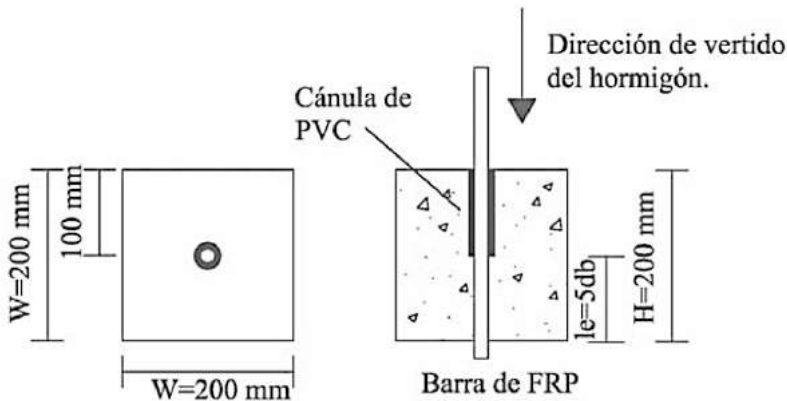


Fig. 2.23.- Ensayo de Pullout centrado. Dimensiones y características según ACI.440.3R-04.

### 2.7.1 Análisis del comportamiento adherente de las barras de CFRP con el hormigón.

Dado que la investigación planteada en este trabajo trata sobre la influencia de las altas temperaturas en la adherencia de las barras CFRP con el hormigón, se abordarán con detalle tanto la adherencia como la influencia de la temperaturas elevadas.

Así, como se avanzó en la introducción, siendo uno de los objetivos de la sustitución del armado de acero en el hormigón por barras de CFRP, se estudiará pormenorizadamente la unión de ambos materiales, los mecanismos que generan la unión precisa para soportar las tensiones de servicio y garantizar la durabilidad del elemento estructural.

<sup>2</sup>La traducción literal al castellano del término “splitting” sería la división o rotura del hormigón por fisuración longitudinal.

Es mucha la información disponible acerca de la adherencia entre barras de acero y hormigón, pero no tanta la que hace referencia a la diferente respuesta adherente ante ambientes diversos de las barras de CFRP con el hormigón.

Inicialmente, se parte de la hipótesis de similitud con el acero, pero se constatará pronto que la diferencia entre el material homogéneo e isótropo del acero difiere mucho de la heterogeneidad y anisotropía de las barras de CFRP, hecho que afectará de manera determinante al modo en que se moviliza el comportamiento adherente.

La adherencia dependerá, según lo apuntado, de la interfaz entre hormigón y armado, lugar en el que se concentra la transmisión de tensiones. Y ello dependerá fundamentalmente de tres mecanismos:

- a) Adhesión química hormigón - armado.
- b) Rozamiento entre hormigón - barra.
- c) Acuñaamiento mecánico hormigón - barra.

Cada uno de estos mecanismos de adherencia, serán los responsables de la actuación conjunta de ambos materiales en unos estadios diferentes de la entrada en carga del elemento.

Será objeto de estudio y análisis detallado el caso concreto de cada uno de los recubrimientos superficiales de las tipologías de barras de CFRP, que condicionarán la forma de movilizar la tensión de adherencia, su rigidez o fragilidad y sus valores residuales.



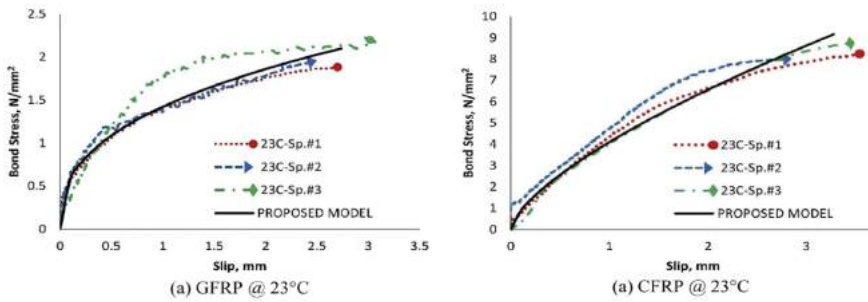


Fig. 2.24.- Gráficas de curvas tipo ascendente en deslizamiento de ensayo pullout de barras de CFRP y GFRP a 23 ° C (Hamad R. J. et al., 2017)

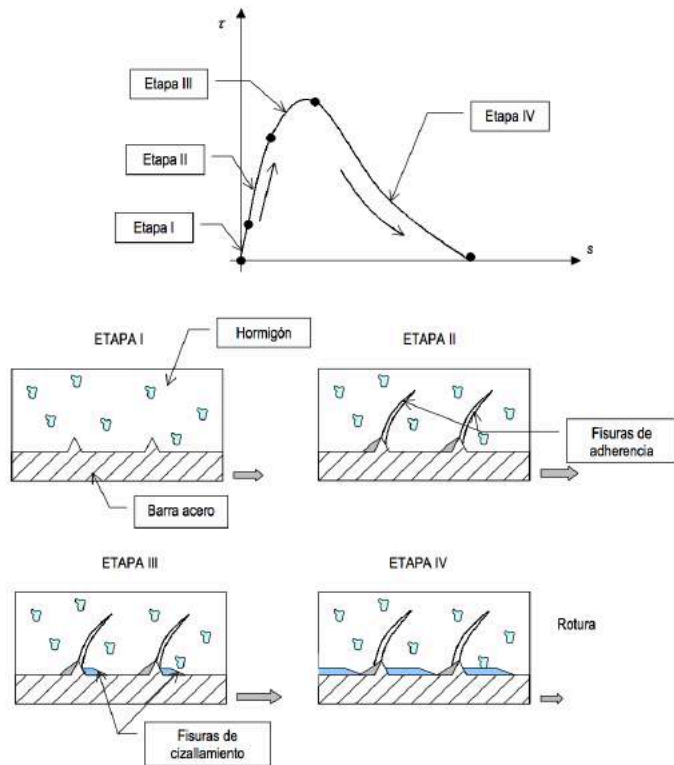


Fig. 2.25.- Evolución de la respuesta adherente de un elemento de hormigón armado. En este caso, con armado de acero. (Fernández, 2003)

Como se aprecia en la fig. 2.26, según aumentan las tensiones, se movilizan mecanismos diferentes para ofrecer paulatinamente mayor resistencia al deslizamiento, hasta llegar a la rotura.

En la presente tesis doctoral se analizan dos tipos de barras CFRP, que son las Arenadas y las Corrugadas, ambas incluidas en el grupo de barras que llevan un tratamiento superficial para mejorar su adherencia.

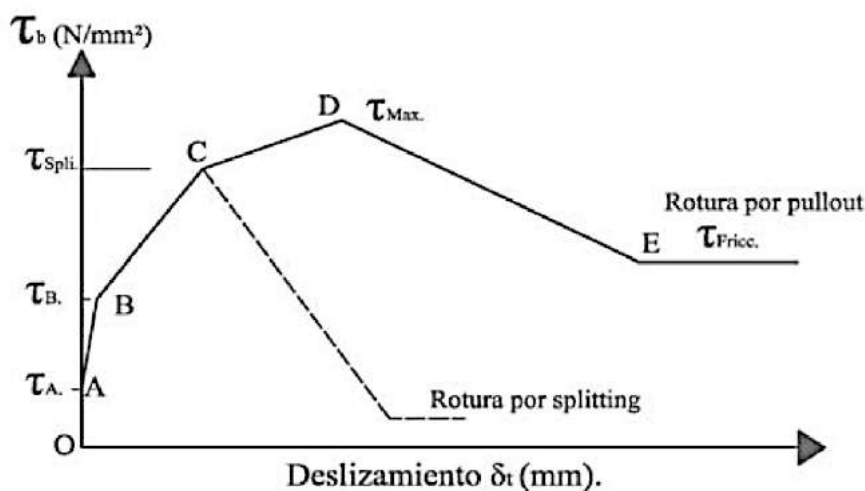


Fig. 2.26.- Gráfica Tensión Adherencia / Deslizamiento de barras CFRP con tratamiento superficial (Calvet, 2014; FIB, 2000)

A continuación, se describe en detalle cómo evoluciona la adherencia de estas barras con el hormigón en cada uno de los tramos de la Fig. 2.26, caracterizada según la respuesta al ensayo de “pullout”:

**TRAMO OA:** Es el tramo inicial, en que el elemento comienza a recibir tensiones. Como se indicó anteriormente, en esta

fase inicial la adherencia se desarrolla químicamente entre la superficie tratada de la barra CFRP y el hormigón, no existiendo deslizamiento relativo. Los valores de tensión adherente para cada una de los dos tratamientos estudiados son:

- Barras CFRP Corrugadas: de 2,5 a 5,0 MPa (Achillides et al., 2004).

- Barras CFRP Arenadas: de 3,5 a 12,0 MPA (Aiello et al., 2007).

Es decir, que las barras con recubrimiento de arena son las que movilizan mayor tensión adherente en este estadio inicial.

**TRAMO AB.-** Al incrementar la tensión, se produce una rotura del mecanismo de adhesión química, lo que supone un inicio de desplazamiento relativo de la barra respecto del hormigón. Esto sucede en el extremo tensionado, comenzando a desarrollarse la adherencia por acuíñamiento mecánico en el caso de las barras corrugadas (Fig. 2.22), y por fricción en las barras arenadas, gracias a su geometría superficial. Estos esfuerzos llevarán al hormigón a su máxima tensión resistente a tracción.

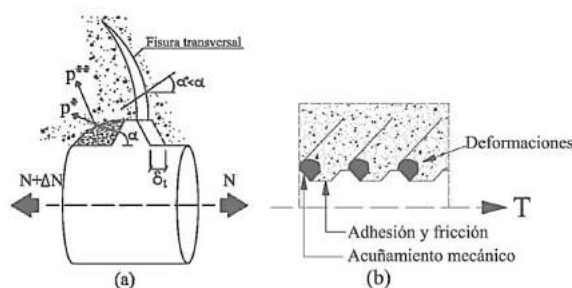


Fig. 2.27.- Mecanismos de Adherencia y Deslizamiento. a) Deslizamiento relativo de la barra respecto del hormigón y acción de acuíñamiento b) Adherencia por adhesión química, fricción y acuíñamiento. (Adaptado; FIB, 2000).

**TRAMO BC.-** El aumento notable de las tensiones de acúñamiento, así como de la fricción, dependiendo del tipo de barra, conlleva un aumento del deslizamiento relativo barra/hormigón, con la reducción significativa de la rigidez en el comportamiento adherente. Según Achillides et al., (2004), sigue sin producirse deslizamiento del extremo no tensionado hasta finalizar este tramo.

Como se observa en la Fig. 2.28, las tensiones de acúñamiento mecánico son equilibradas con la reacción del hormigón que la rodea, con un ángulo “ $\alpha$ ”, que depende del módulo elástico y la geometría superficial de la barra CFRP y la resistencia a cortante del hormigón (Achillides et al., 2004; Tepfers et al., 2003).

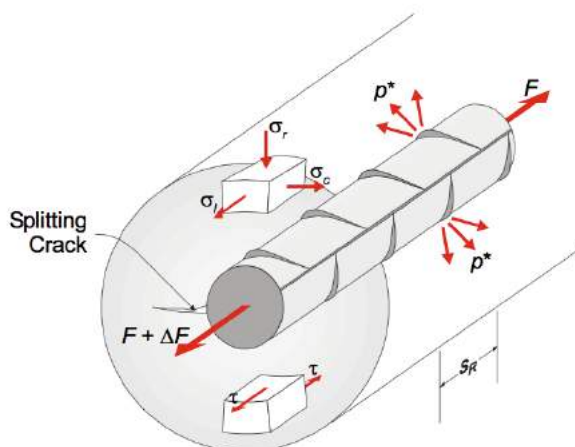


Fig. 2.28.- Fisuras transversales longitudinales por splitting. (FIB, 2000).

La resistencia del hormigón a la rotura por “splitting” es determinante para seguir siendo capaz de aumentar la resistencia de la tensión adherente. Si las fisuras por “splitting” aparecen en toda la longitud de anclaje, la rotura es impedida solamente por la resistencia a tracción del hormigón.

**TRAMO CD.-** Es en este estadio donde, una vez se ha producido las fisuras por “splitting”, únicamente el hormigón que está produciendo el confinamiento de la barra CFRP puede evitar la rotura debida a esa fisuración, alcanzando la tensión adherente máxima, cuando ya ambos extremos de la barra presentan deslizamientos relativos.

El diferente tipo de tratamiento superficial va a ser determinante en este estadio para la obtención de la máxima tensión adherente. Así, las barras corrugadas tienen un comportamiento similar al de las barras de acero, como se puede observar en la tabla 2.9.

Investigación	Barra de CFRP corrugada			Barra de acero corrugada		
	$\tau_b$ (MPa).	$\delta_t$ (mm)	$\delta_{nt}$ (mm)	$\tau_b$ (MPa)	$\delta_t$ (mm)	$\delta_{nt}$ (mm)
Nanni et al., 1995.	22,5	0,57	0,25	18,5	1,90	0,95
Benmokrane et al., 2002.	23,4	-	-	24,6	-	-
Achillides et al., 2004.	13,7	0,55	0,19	16,6	0,58	0,82
Okelo et al., 2005.	26,4	0,66	0,30	23,8	8,15	0,36

Donde:  $\tau_b$ , es la tensión adherente máxima.  $\delta_t$ , es el deslizamiento, en el punto de tensión adherente máxima, en el extremo de la barra tensionado.  $\delta_{nt}$ , es el deslizamiento, en el punto de tensión adherente máxima, en el extremo de la barra no tensionado.

Tabla 2.9.- Comparativa de datos ensayos de adherencia pullout en barras corrugadas CRFP y Acero (Calvet, 2014).

Llegado este punto, la rotura dependerá de la relación entre resistencia del hormigón a tracción y la del cortante de las corrugas, en las que intervienen diversos factores, que se pueden ver en la Fig. 2.29.

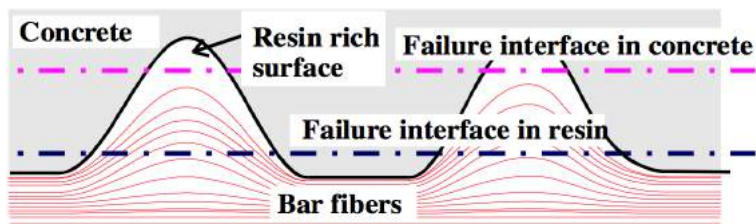


Fig. 2.29.- Fallo en la interfaz entre hormigón y armadura de barras FRP (Achillides et al., 2004).

En las barras CFRP corrugadas, según FIB (2007), se produce la rotura de cuatro modos diferentes:

a) Corte parcial o total de las corrugas: La resistencia del hormigón no es tan determinante en este caso, sino que la propia resistencia a cortante de la corrugas es la que condicionará la rotura. La composición de las corrugas y sus interfaz con el resto de la barra serán responsables de la respuesta que pueda llegar a ofrecer en su función adherente. En la Fig. 2.30 se puede observar el efecto del corte de las corrugas, quedando algunas embebidas en el hormigón tras la rotura por pullout, mientras otras han soportado la tensión.



Fig. 2.30.- Barra CFRP corrugada ensayada por pullout, con rotura por corte de corrugas. a) Barra con corrugas seccionadas tras ensayo. b) Probeta de hormigón con restos de corruga tras ensayo (Elaboración propia, 2016).

b) Rotura por corte del hormigón entre corrugas de la barra.- Las corrugas producen la rotura del hormigón; es decir, al contrario que el caso anterior.

c) Modo combinado.- Presenta rotura de hormigón por cortante en algunas zonas, y corte de corrugas en otros. La Fig. 2.30 es un caso de este tipo de rotura.

d) Aplastamiento de la barra.- Se da cuando la rigidez transversal de la barra es pequeña, pudiendo ser aplastada por el hormigón al producirse elevadas tensiones, dirigiendo tensiones hacia el interior de la probeta.

Con relación a las barras de CFRP arenadas, se ha observado que alcanzan una tensión adherente similar o menor que las barras de acero; igual sucede con el deslizamiento relativo, además de que su comportamiento se más rígido. Los resultados de ensayos comparativos se pueden observar en la tabla 2.10.

Investigación	Barra de CFRP arenada			Barra de acero corrugada		
	$\tau_b$ , (MPa).	$\delta_t$ (mm)	$\delta_{nt}$ (mm)	$\tau_b$ , (MPa)	$\delta_t$ (mm)	$\delta_{nt}$ (mm)
Benmokrane et al., 2002.	20,0	-	-	24,6	-	-
Okelo y Yuan, 2005.	21,3	0,15	-	24,9	22,66	2,87
Aiello, Leone y Pecce, 2007.	2,86	0,58	0,02	8,82	2,13	1,4
	3,64	0,36	0,034			
Baena et al., 2009.	26,11	1,45	0,179	29,09	7,64	0,534

Donde:  $\tau_b$ , es la tensión adherente máxima.  $\delta_b$ , es el deslizamiento, en el punto de tensión adherente máxima, en el extremo de la barra tensionado.  $\delta_{nt}$ , es el deslizamiento, en el punto de tensión adherente máxima, en el extremo de la barra no tensionado.

Tabla 2.10.- Comparativa de datos de ensayos de adherencia por pullout en barras de CFRP arenadas y de acero corrugadas (Calvet, 2014).

Como se aprecia, existe una disparidad de resultados entre Aiello et al. (2007) y el resto de investigadores, que se debe al tipo de tratamiento superficial aplicado para conseguir la capa de arena;

concretamente, la resina polimérica que se utiliza para adherir los gránulos de arena a la barra determina en gran medida la eficacia final potencial que tendrá para desarrollar tensión de adherencia por fricción.

En cualquier caso, su modo de rotura es frágil, produciéndose un rotura instantánea una vez superada la tensión adherente máxima, con la particularidad de que el deslizamiento relativo es sintomáticamente más bajo que el de las barras corrugadas.

Con hormigones de resistencia a compresión superiores a 35 MPa, la rotura por pullout se produce por el desprendimiento completo de la capa de arena, tal como se observa en la Fig. 2.31.

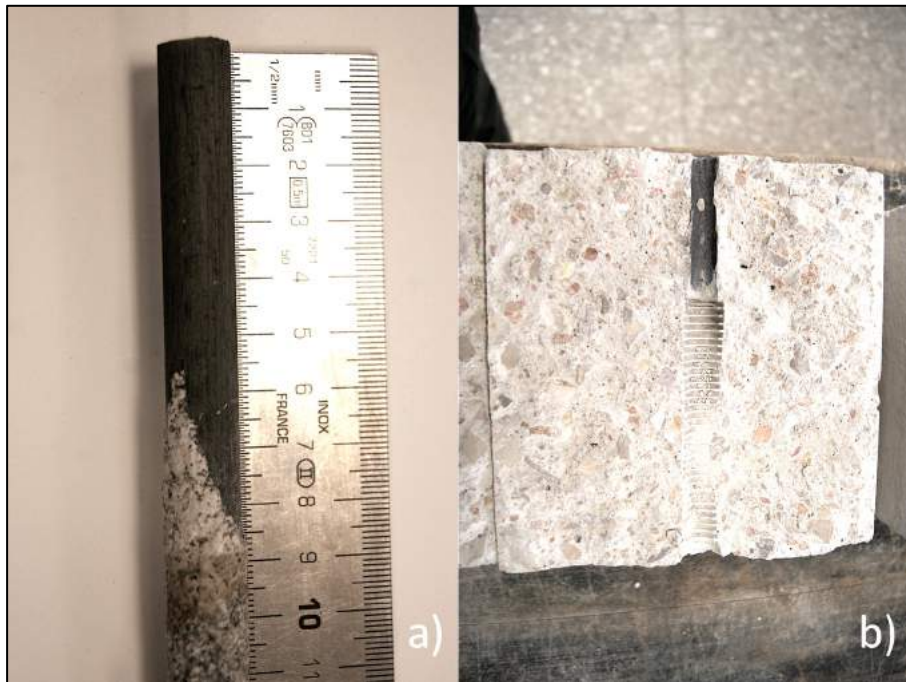


Fig. 2.31.- Barra CFRP Arena ensayada por pullout, con rotura desprendimiento completo de la capa de arena. a) Barra en la que ha desaparecido la capa de arena tras ensayo. b) Probeta de hormigón con restos de la capa de arena tras ensayo (Elaboración propia, 2016).



**TRAMO DE.-** Una vez alcanzada la tensión adherente máxima, se entra en este estadio, caracterizado por los diferentes modos de respuesta, según el método de rotura:

a) Si la rotura se produce por Corte de Corrugas, el mecanismo de acúñamiento es sustituido por el de fricción, que dependerá en gran medida del estado de la superficie y las corrugas seccionadas (Nanni et al., 1995) .

b) Si la rotura es por corte del hormigón, se produce el deslizamiento de la barra, de manera similar a como lo hacen las barras de acero.

c) Si el método es combinado, la entrada en la zona de longitud de anclaje de una nueva corruga, potencia la fricción con mayor acúñamiento, pudiendo mantener una tensión adherente cercana al 75% de la tensión máxima, como se aprecia en la Fig. 2.32 (Achillides et al., 2004).

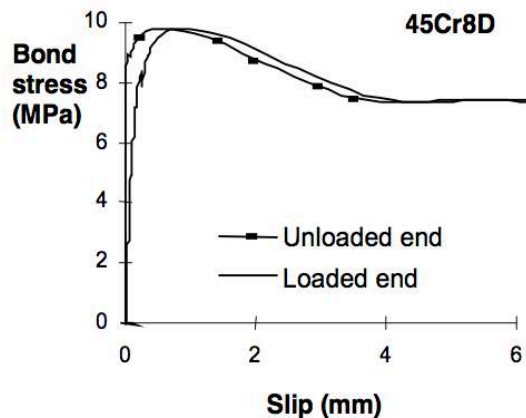


Fig. 2.32.- Comparativa de comportamiento adherente entre barras de CFRP y acero (Achillides et al., 2004)

En este estadio, el comportamiento adherente de las barras de CFRP arenadas se caracteriza por la rotura frágil, tal como se apuntó anteriormente, al producirse el desprendimiento del recubrimiento de

arena, cosa que sucede de manera instantánea, al perder la adherencia de los gránulos de arena con la barra. Como se observa en la Fig. 2.33, la tensión adherente cae abruptamente al llegar la tensión máxima, momento en el que se produce el deslizamiento completo de la barra, algo que sucede tanto en el extremo tensionado como en el no tensionado.

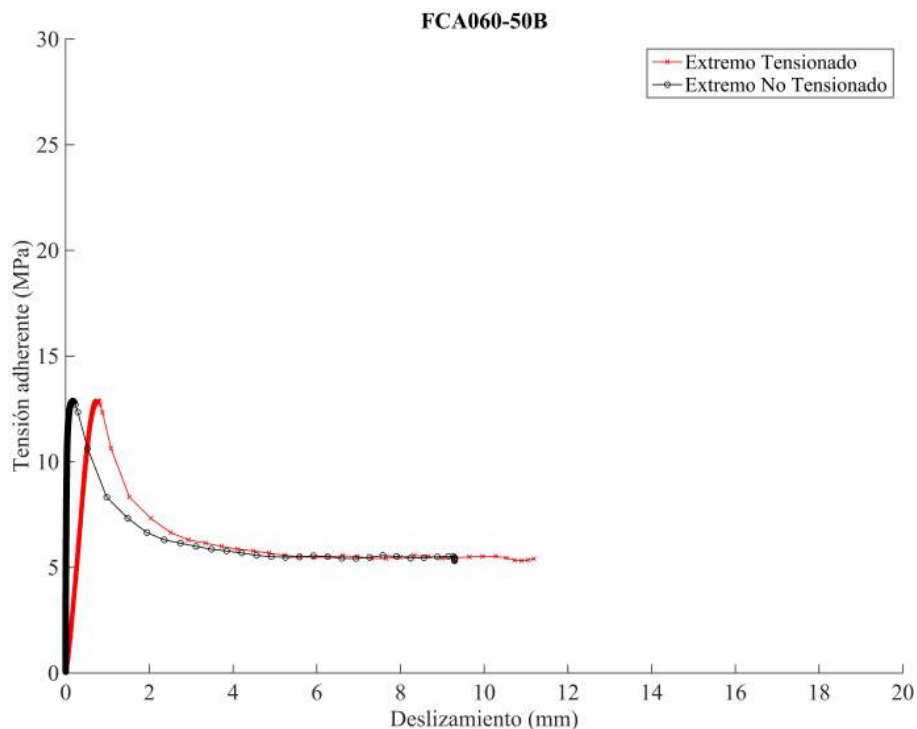


Fig. 2.33.- Gráfica Tensión adherente y Deslizamiento de barras de CFRP con recubrimiento de arena (Elaboración Propia, 2017).

Se constata lo ya avanzado, es decir, que los diferentes tratamientos superficiales tienen una incidencia determinante en la adherencia de las barras CFRP y el hormigón, pero, sobre todo, sobre su forma de rotura, que condiciona considerablemente su uso, debiendo prever este extremo en el diseño estructural, con la

utilización de coeficientes de seguridad que, en caso de las barras arenadas, garanticen su utilización sin llegar a la tensión máxima adherente, tras la que se produciría una rotura frágil.

Será necesario, una vez se ha descrito el comportamiento adherente de las barras de CFRP con tratamiento superficial, concretamente Corrugas y Recubrimiento de Arena, estudiar qué puede influir en este.

Los diferentes estudios llevados a cabo sobre el comportamiento adherente (Al-Zahrani et al., 1999; Bakis et al., 1993; Calvet, 2014; Cosenza et al., 1997; Focacci et al., 2000; Kanakubo, et al., 1993; Achillides et al., 2004; Tomosawa et al., 1997; Yuan et al., 2001), han venido a constatar que el comportamiento adherente de las barras de CFRP con el hormigón depende en gran medida de:

- a) Resistencia a tracción y cortante de las barras de CFRP.
- b) Resistencia a compresión del hormigón.
- c) Diámetro de la barra.
- d) Geometría superficial de la barra.
- e) Presión de confinamiento.
- f) Longitud de anclaje.
- g) Espesor del recubrimiento.
- h) Posición de la barra respecto al hormigonado.
- i) Temperatura.

Como se aprecia, unas son características del hormigón y otras de las barras de CFRP.

## **2.8 Influencia de la Temperatura en el comportamiento adherente de las barras de CFRP con el hormigón.**

Los estudios sobre las altas temperaturas que provocan descensos acusados sobre la adherencia se han realizado, sobre todo, en rangos cercanos a la  $T_g$ , temperatura de transición vítrea de la resina, por ser la causa más obvia de modificación de las propiedades de la barra. No así en temperaturas en por debajo de los 100 °C; pero que, en cambio, puede ser habituales en condiciones de servicio.

Es conveniente recordar que un elemento estructural expuesto al sol, en la zona climática del mediterráneo, puede alcanzar en verano valores superiores a los 80 °C en su superficie. Ello, por no entrar a considerar los supuestos a los que se enfrenta ese mismo elemento estructural en lugares extremos, como los desiertos de la península arábica, lugares como Dubai, Qatar, Oman, etc... (Joisel, 1981).

La resistencia del enlace entre los refuerzos internos de FRP y el hormigón depende de las características del polímero de resina en la superficie de la barra FRP (Rafi, 2007). Las propiedades mecánicas y la microestructura de la matriz polimérica, especialmente en la superficie de contacto entre el hormigón y la barra, se ven afectadas negativamente por altas temperaturas cuando superan la  $T_g$ , lo que lleva a una pérdida de adherencia entre la barra de CPRF y el hormigón (Bisby, 2005).

Debido al diferente coeficiente transversal de expansión térmica de las barras FRP y el hormigón, se crea una alta presión radial sobre la superficie del refuerzo provocando tensiones de ruptura dentro del hormigón. Cuando estas tensiones debidas al diferente comportamiento ante el calor de los distintos materiales alcanzan la resistencia a tracción del hormigón ( $f_{ct}$ ), se producen micro-grietas que dan lugar al debilitamiento de los enlaces (Lublóy, et. al. 2005).

La resistencia de unión entre las barras de FRP y el hormigón se ve gravemente afectada, incluso a temperaturas relativamente bajas (Bisby L. W. et al., 2005). Se ha observado una pérdida rápida en la fuerza de unión, hasta un 60% de la temperatura ambiente, a 100 °C. A una temperatura de 200 °C, las resistencias de unión disminuyen hasta 10-20% de su resistencia a temperatura ambiente.

Las normas canadienses CAN/CSA-S806-02 estipulan que las estructuras de FRP-RC fracasan cuando la barra FRP pierde un 50% de su resistencia a temperatura ambiente. Debido a la falta de datos sobre las propiedades mecánicas y térmicas de una amplia variedad de productos FRP disponibles en el mercado, no es factible definir con precisión la temperatura crítica para FRP que afecta a sus propiedades y la resistencia de unión con el hormigón.

Diversos trabajos indican que se puede suponer que la temperatura crítica, aquella en la que las propiedades mecánicas de la barra sufren una acusada reducción, oscila entre 250 ° C y 500 ° C (Wang Y. W., et al., 2007; Robert, M., et al., 2010). Pero se consta que, en estudio de Hamad et al. (2017), las barras de FRP habían perdido hasta el 55%, 30% y 81,5% de su resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y resistencia de unión con el hormigón después de la exposición a 325°C, en GFRP, CFRP y BFRP, respectivamente.

Con relación al comportamiento de las diferentes barras de armado, las de acero alcanzan la mayor tensión adherencia y rigidez mientras que las de CFRP muestra la mayor resistencia de unión con hormigón entre las barras de FRP debido a sus mejores características superficiales seguidas en secuencia por las de GFRP y las de BFRP, respectivamente. El porcentaje de reducción en la resistencia y rigidez de la unión es más pronunciado en los ensayos de pullout de barras de FRP que en aquellas con barras de acero bajo temperaturas elevadas (Fig. 2.34).

El porcentaje de reducción de la resistencia de adherencia entre el hormigón y el BFRP, el GFRP, el CFRP y las barras de acero después de la exposición a 125, 250 y 325 °C oscilan entre un 21,8%, 60,9% y 79,9% para BFRP, un 27,4%, 51,2% y 79,2% para GFRP 250 °C y un 16%, 43,6% y 81,5% para CFRP y un 5,5%, 20% y 27,2% para las barras de Acero (Hamad R. J., 2017).

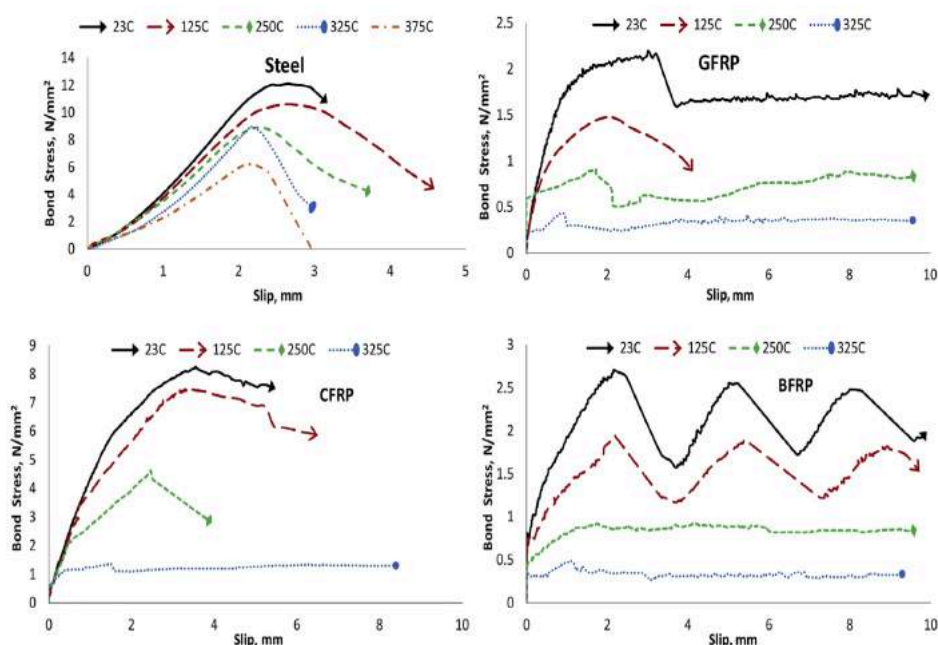


Fig. 2.34.- Curvas típicas de tensión-deslizamiento de la unión de diferentes muestras de ensayos pullout sometidas a diferentes temperaturas (Hammad, 2017).

Bar Type	Temp. (°C)	F <sub>u</sub> (kN)	SAF (mm)	E <sub>u</sub> (mm)	UBS (MPa)	SABS (mm)	RUBS/UBS
GFRP	23	6.328	4.022	1.282	2.014	2.740	100%
	125	4.593	3.038	0.977	1.462	2.060	72.6%
	250	3.150	2.627	0.735	1.003	1.892	49.8%
	325	1.316	1.384	0.336	0.419	1.048	20.8%
BFRP	23	8.256	3.635	1.197	2.628	2.438	100%
	125	6.453	3.136	0.978	2.054	2.158	78.2%
	250	3.227	2.496	0.534	1.027	1.962	39.1%
	325	1.741	1.319	0.320	0.554	0.999	21.1%
CFRP	23	26.198	5.380	2.101	8.339	3.279	100%
	125	22.007	4.943	1.915	7.005	3.028	84%
	250	14.765	3.626	1.402	4.700	2.224	56.4%
	325	4.844	2.177	0.570	1.542	1.607	18.5%
Steel	375	2.719	2.729	0.462	0.865	2.267	10.4%
	23	35.54	4.45	0.99	11.31	2.85	100%
	125	33.59	3.79	1.05	10.69	2.74	94.5%
	250	28.45	3.16	0.87	9.06	2.28	80.0%
	325	25.87	2.71	0.79	8.24	1.93	72.8%
	375	24.59	3.35	0.73	7.83	2.62	69.2%

Fig. 2.35.- Características de la tensión adherente y deformación en ensayos pullout con diferentes barras y temperaturas de exposición (Fu: fuerza máxima medida, SAF: carrera a fuerza máxima, EL: alargamiento de barra, UBS: tensión adherente, SABS: deslizamiento a máxima resistencia de unión, RUBS: resistencia residual final de la unión, CE: etapa final). (Hammad, 2017)

Pero si se pone atención a lo que sucede en el entorno de los 50 a 100 °C, se comprueba que el comportamiento adherente de las barras de CFRP va a tener una gran dispersión de resultados, dependiendo fundamentalmente del tipo de resina de la matriz polimérica y del mecanismo adherente que moviliza; es decir, del tratamiento superficial que se utiliza en cada tipología.

Se puede establecer, por las investigaciones realizadas, que existe una reducción en el entorno del 20 al 30% en temperaturas de 80 °C respecto a las de 20 °C (Davalos, 2008), pero no hay apenas trabajos que segmenten estos resultados por tipología de tratamiento superficial, lo que como se ha avanzado, influye de manera determinante en la adherencia y forma de rotura a esas temperaturas altas, pero menores de 100 °C; es decir, las que se pueden dar en un elemento estructural visto cualquiera en estas latitudes.

En estudio de Álvarez et al. (2005) se determina que no existe variación en el modo de rotura por adherencia en las barras de CFRP con el hormigón, como se muestra en la Fig. 2.36. Esto difiere respecto a otros estudios, por lo que es necesario seguir investigando

para arrojar más luz en estos estadios, tal como se plantea en esta tesis.

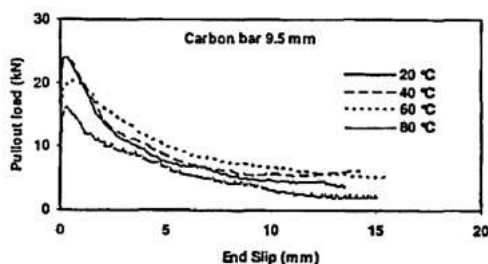


Fig. 2.36.- Comportamiento de adherencia de las barras de CFRP Arenadas en ensayos de pullout a diferentes rangos de temperaturas (Álvarez et al., 2005)

Los tratamientos superficiales, por tanto, resultarán definitivos para estas temperaturas, mostrando mayor tensión adherente residual las barras de FRP con algún tipo de recubrimiento superficial. Katz et al., (1999, 2000), constataron que las barras de FRP arenadas o con hélice adherida desarrollan a 200 °C mayor tensión adherente residual que otras barras con anclaje mecánico. Como se ha citado, la tensión adherente se verá influenciada por altas temperaturas dependiendo de la resina constituyente de la matriz polimérica que forma la interfaz con el núcleo de la barra; además de, lógicamente, la temperatura de transición vítrea. El deterioro de la resina en el interior del núcleo también provoca que el aplastamiento inducido por los esfuerzos de las fibras sea mayor, y que los daños se amplifiquen (Fig. 2.37).

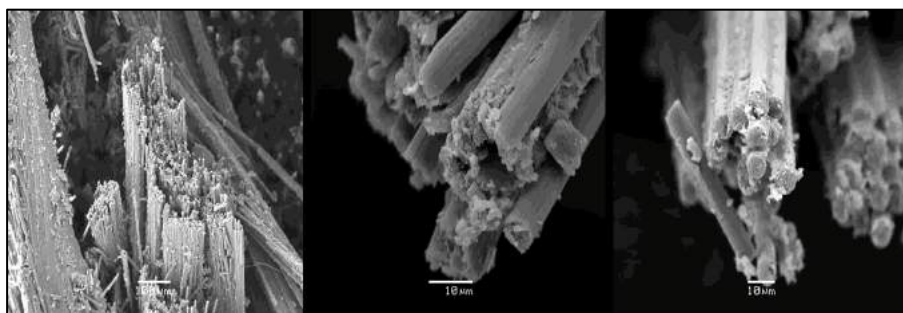


Fig. 2.37.- Resultados de rotura del compuesto en ensayos de flexión de barras de CFRP (Suárez, 2011)



Como se apunta, los estudios de influencia sobre la adherencia de las barras de CFRP se concentran en temperaturas en el entorno de la de transición vítrea o mayores (Hamad R. J., 2017) con los resultados que pueden resumirse en los expuestos en la Fig. 2.38.

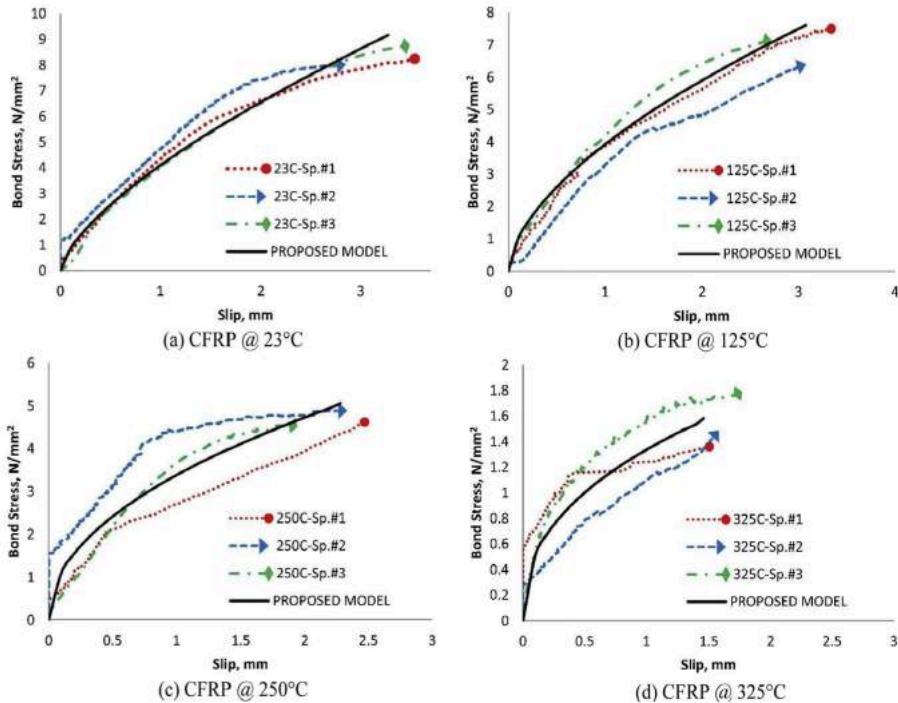


Fig. 2.38.- Resultados de ensayos pullout con gráficas Tensión / Deformación para barras CFRP expuestas a diferentes temperaturas (Hammad et al., 2017)

Los autores del estudio reflejado en la Fig. 2.38 concluyen proponiendo un modelo de predicción de la tensión adherente en el que, como se aprecia, los descensos a partir de 125 °C son muy acusados.

La temperatura crítica en la que las barras de FRP habían perdido la mayor parte de su adherencia con el hormigón era 325°C.

El fallo por adherencia se produce en barras GFRP y BFRP, mientras que se observa fracaso en el corte de hormigón entre corrugas en aquellas con barras de acero, especialmente después de la exposición a 325°C y superiores.

Asimismo, en la Fig. 2.39 se reflejan los resultados de resistencia a tracción de las barras de CFRP por debajo de los 100 °C (Hammad et al., 2017), que marcan una constante, reflejando que no se ve afectada su capacidad resistente; esto es interesante, pues descartaría su efecto negativo en la resistencia adherente entre la barra y el hormigón.

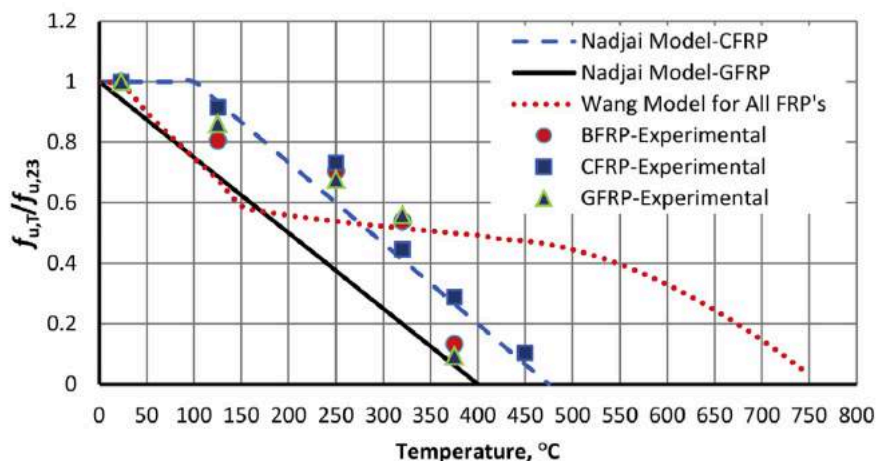


Fig. 2.39.- Resistencia residual a tracción para barras FRP bajo temperaturas elevadas (Hammad et al., 2017).

En cualquier caso, los ensayos registrados en la literatura consultada se han realizado, en su mayoría, en edades tempranas, por lo que cabría reforzar con los resultados de la presente tesis la evolución a edades mayores (Fig. 2.40).

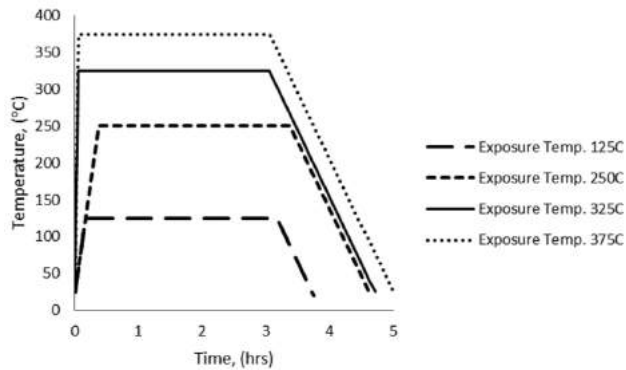


Fig. 2.40.- Tiempos de exposición a temperaturas de estudio para ensayos de pullout en trabajo de Hammad et al. 2017

## 2.8.1 Otros factores que afectan al comportamiento adherente de las barras de CFRP con el hormigón.

### 2.8.1.1. Resistencia a tracción de las barras de CFRP

La resistencia a tracción de las barras de CFRP es muy superior al de las barras de acero, tal como se puede observar en la Fig. 2.29.

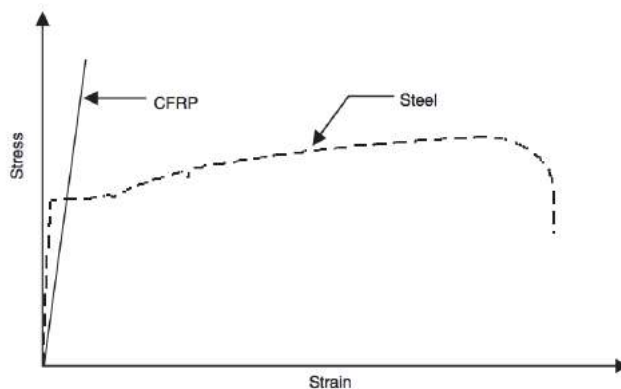


Fig. 2.41.- Respuesta Tensión-Deformación de barras de acero y CFRP (Masood Rafi, 2007).

Con relación al módulo elástico de estas barras, y debido a su elevado valor, cabría notar que la incidencia final en la adherencia con el hormigón tendrá una importancia muy relativa. Hay autores que llegan a considerar que no tiene incidencia (Kanakubo et al., 1993)

Cierto que Aiello et al. (2007), llegan a diferente conclusión, estimando que a igualdad de tratamiento superficial de las barras de CFRP, desarrollan más tensión adherente las que tienen mayor módulo elástico, con un menor deslizamiento relativo barra/hormigón.

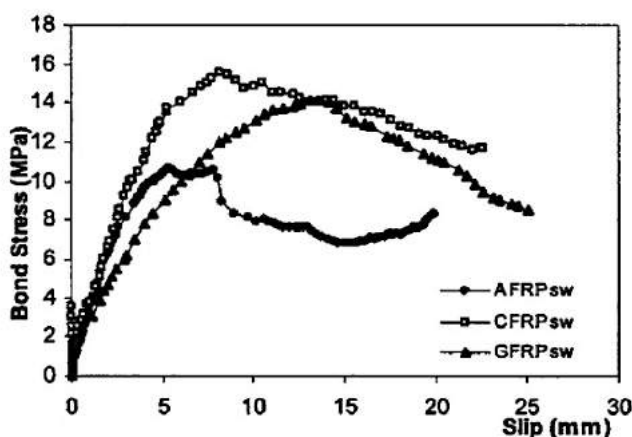


Fig. 2.42.- Gráfica comparativa del comportamiento adherente entre barras FRP con aramida, carbono y vidrio, y tratamientos de arena y hélice adherida, respectivamente (Aiello et al., 2007).

También Achillides et al., (2004) relacionan el mayor módulo elástico de las barras con menores tensiones de “splitting”, lo que afectaría a la adherencia. Esto ocurre en las CFRP, con mayor módulo elástico que las de GFRP.

### *2.8.1.2. Resistencia a cortante de las barras de CFRP*

La resistencia a cortante de la barra, concretamente en la superficie de la misma, es importante para la adherencia, pues favorece la mayor movilización de tensión adherente en la interfaz barra/hormigón.

Dependerá, por ello, del tratamiento superficial y de la resina que forma la matriz polimérica (véase apartado 2.2.1).

Se ha constatado que las barras con matriz polimérica compuesta por resina de epoxi presentan mayor resistencia a cortante, que lleva a que en esas barras la tensión adherente alcance aproximadamente valores doble que las constituidas por resinas de viniléster (Nanni et al., 1995).

### *2.8.1.3. Resistencia a compresión del hormigón.*

Es uno de los factores que determinan, no sólo la adherencia, sino el tipo de rotura que tendrá el elemento estructural una vez se supere la tensión adherente máxima.

En la Fig. 2.43 se recogen datos de estudio de Baena et al., (2008) en que se describe la relación directa entre el confinamiento de las barras de CFRP en un hormigón de mayor o menor resistencia a compresión.

Se puede observar como en el caso de C2, que es un hormigón que adquiere mayor resistencia a compresión que el C1, la adherencia que se consigue en todas las barras indicadas es mayor. Los hormigones con dosificación C2 alcanza resistencias a compresión media superior a 20 Mpa, mientras que los de dosificación C1, resistencias a compresión del hormigón medias de 12 Mpa.

En sentido, en el proyecto EUROCONCRETE se llegó a la conclusión que para hormigones de resistencia a compresión mayor a 30 Mpa, se produce el deslizamiento relativo es en la superficie de la barra, no viéndose afectada la tensión adherente por la resistencia del hormigón, sino por las propiedades de la barra de CRFP (Baena et al., 2008).

Dosificación hormigón C1		Dosificación hormigón C2	
Componente	kg/m <sup>3</sup>	Componente	kg/m <sup>3</sup>
Agua	200	Agua	171.5
Cemento 42.5	325	Cemento 52.5	380
Áridos finos	875	Áridos finos	843
Áridos gruesos	878	Áridos gruesos	943
Aditivo polifuncional Rheobuild 570	2.6	Superplastificante Glenium ACE 325	4.6



Fig. 2.43.- Composición y características del hormigón, y acabados y nomenclaturas de las barras (Baena et al., 2008)

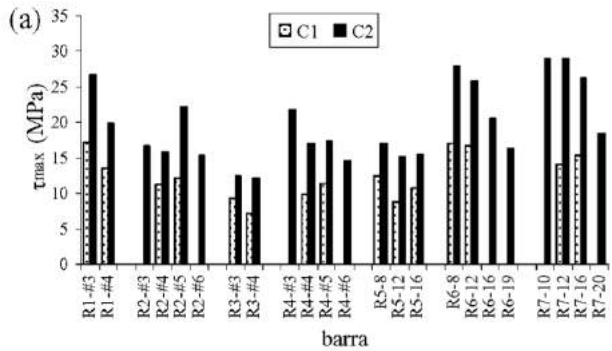


Fig. 2.44.- Comparativa Tensión Adherente según tipo hormigón (Baena et al., 2008)

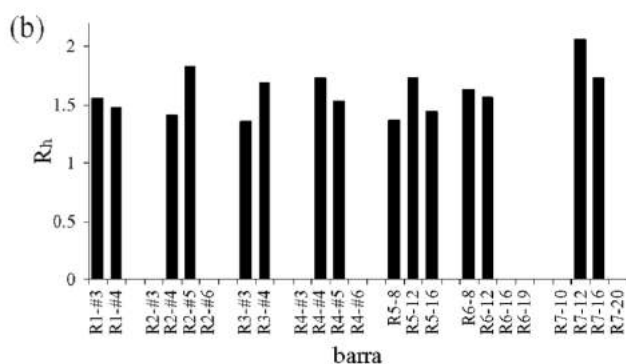


Fig. 2.45.- Ratio de incremento de la tensión adherente por cambio de hormigón (Baena et al., 2008)

#### 2.8.1.4. Diámetro de la barra de CFRP

Los estudios sobre la influencia de la medida del diámetro de la barra de CFRP sobre la adherencia con el hormigón (Achillides et al. 1997, 2004; Baena et al., 2008; Benmokrane, 1996; Nannin et al., 1995; Tepfers, 2006) concluyen que disminuye la tensión de adherencia cuando se aumenta el diámetro de barra.

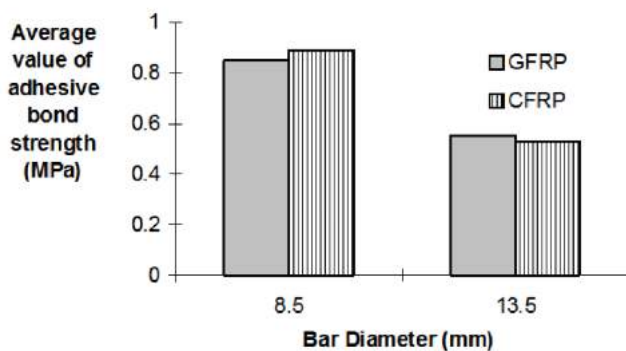


Fig. 2.46.- Valores medios de la tensión adherente con respecto al tipo de barra y diámetro (Achillides, 2004).

En la Fig. 2.46 se observa la incidencia del diámetro de la barra con relación a la tensión adherente máxima conseguida; a mayor diámetro, disminuye la adherencia.

Dicha reducción se debe a diversos factores.

- Aumento longitud de adherencia. - Debido a que se aumenta el diámetro, se aumenta la longitud de la sección. Ello provoca que la diferencia de tensiones en cada punto de esa longitud lleve a que la tensión media final sea menor.

- Efecto de Poisson. - La reducción de la sección transversal al producirse la tensión de la barra es mayor que en barras de diámetro menores, lo que afectará negativamente a la tensión adherente final.

- Efecto “shear lag”. - (FIB, 2006). - Dado que las barras de FRP presentan poca rigidez a esfuerzos cortantes, se inducen movimientos relativos entre las fibras del núcleo de la barra respecto de las fibras superficiales, provocando una distribución no uniforme de la tensión normal de la sección transversal de la barra (Baena et al., 2008).

### *2.8.1.5. Geometría superficial de la barra.*

Tratándose de adherencia, dado que esta se produce entre la superficie de la barra y el hormigón, es este un aspecto importante, del que dependerá tanto la tensión adherente máxima como el método por el que se desarrolla la adherencia entre la barra de CFRP y el hormigón.

Será determinante el tipo de geometría superficial de las barras. Así, para las barras lisas (que no son objeto del presente estudio) diversos investigadores han encontrado que desarrollan apenas un 20% de la tensión máxima adherente que las barras



corrugadas (Cosenza et al., 1997; Kanakubo et al., 1993; Nanni et al., 1995), no superando los 2,50 Mpa.

Con relación a las barras corrugadas, la respuesta adherente es similar a las barras de acero corrugado, con acuíñamiento mecánico como principal mecanismo adherente.

Las barras de CFRP con recubrimiento de arena movilizan la adherencia por procesos de fricción, siendo muy diferente al acuíñado, consiguiendo mayor tensión adherente con menor deslizamiento relativo que en las barras corrugadas de CFRP, pero finalmente, su rotura será frágil, como se apuntó en apartados anteriores.

### 2.8.1.6. Confinamiento

El confinamiento de la barra dentro del hormigón tiene una incidencia dispar según el tratamiento superficial. En cualquier caso, dado que la resistencia de las barras de CFRP a cortante es menor que la del acero, su influencia respecto a la adherencia será menor, al producirse la disipación de las tensiones que ocasiona en la superficie de la barra.

Será más acusado en las barras corrugadas de CFRP, pudiendo ver aumentada hasta 2,5 veces su tensión adherente al verse sometida al confinamiento máximo, con importantes daños en las corrugas, reduciendo su altura más de un 60% (Malvar et al., 2004).

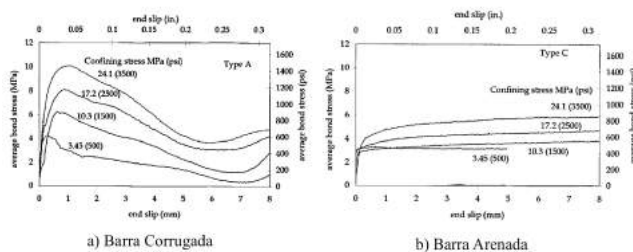


Fig. 2.47.- Comparativa del comportamiento adherente de barras corrugadas (a) y arenadas (b) en ensayo de pullout con confinamiento (Malvar et al., 2004)

En cambio, el confinamiento de las barras CFRP con recubrimiento de arena no produce un aumento significativo de la tensión adherente máxima, debido a que no existen en su superficie diferencias de altura (como ocurre con las corrugas), que no generan en el hormigón el confinamiento necesario para conseguir un aumento de tensión adherente por este efecto. Aun con ello, sí que puede llegar a ser porcentualmente significativo ante importantes variaciones en la resistencia a compresión del hormigón.

### *2.8.1.7. Longitud de anclaje de la barra*

Los ensayos de Achillides et al. (2004) muestran que a mayor longitud de anclaje de la barra de CFRP en el hormigón, menor tensión adherente máxima se moviliza, aumentando la fuerza total que se resiste, así como un aumento en la rigidez inicial.

Achillides et al. afirman que este aumento es resultado de la distribución no lineal de la tensión adherente en la barra de CFRP, tal como sucede con las barras de acero corrugadas. En la Fig. 2.36 se observa este efecto, como a medida que se aumenta la longitud de anclaje, disminuye la tensión adherente.

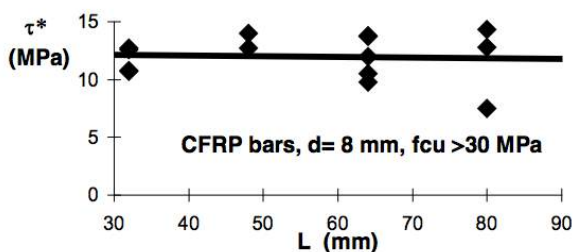


Fig. 2.48.- Relación entre aumento de longitud de anclaje en barras CFRP y Tensión Máxima Adherente (1/2) (Achillides et al., 2004)

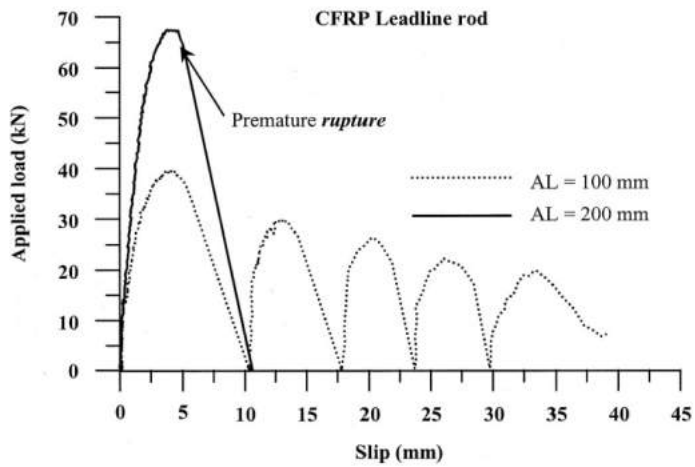


Fig. 2.49 .- Relación entre aumento de longitud de anclaje en barras CFRP y Tensión Máxima Adherente (2/2) (Achillides et al., 2004)



## 3 PLAN EXPERIMENTAL

### 3.1 Introducción

Se ha constatado en el estado del arte que son múltiples las variables que afectan a la adherencia de las barras de CFRP y el hormigón, condicionando la tensión adherente máxima y los modos de rotura. Además, no existe un método de ensayo unificado y referente para comprobar la adherencia y todas las características asociadas.

Asimismo, no existen suficientes estudios acerca del comportamiento adherente de las barras de CFRP con el hormigón con temperaturas altas, pero sí llegar a las próximas a la de transición vítrea ( $T_g$ ). Es por ello que el objeto de esta tesis es profundizar en esos estadios térmicos, desde los 50 °C a los 80 °C, y su influencia en diferentes tipos de barras.

Los criterios para la determinación del comportamiento adherente es, por tanto, esencial para su posterior análisis y discusión. El método de ensayo pullout elegido, dada la disparidad existente, ha sido el especificado en la norma ACI 440-3R-12, pues a falta de unificación, es la más utilizada. En algunos casos, además, se ha complementado con normas ASTM. En la Tabla 3.1 se detallan los métodos de ensayo comparando ASTM con ACI 440.

Con relación a las barras de CFRP a estudiar se ha descartado la tipología lisa, por no presentar las condiciones idóneas para sustituir al acero en el hormigón armado traccionado debido a su reducido comportamiento adherente.

También se ha considerado interesante comparar los resultados obtenidos con estas dos tipologías de barras de CFRP con las barras

de acero, pues su existencia se debe al intento de la industria por resolver los problemas de durabilidad y mantenimiento que supone el hormigón armado con acero estando llamadas a sustituir las (justificación última para la introducción de las barras de CFRP en el diseño de cálculo estructural).

Property	ASTM test method(s)	ACI 440 test method	Summary of differences
Cross-sectional area	D7205/D7205M	—	ASTM D7205/D7205M replaces ACI 440.3R-04 Method B.1.
Longitudinal tensile strength and modulus	D7205/D7205M	—	ASTM D7205/D7205M replaces ACI 440.3R-04 Method B.2.
Bond properties	A944	B.3	ASTM Pullout Test C234 (ASTM C234) has been withdrawn and, as written, did not provide adequate specimen size to prevent splitting of concrete cylinder when using FRP bars. The only remaining ASTM test method for bond of steel bars to concrete is beam-end test method (A944), which has not been modified for use with FRP bars. Ongoing work by ACI Committee 440 is expected to produce beam bond test methods.
Shear strength	D7617/D7617M	—	ASTM D7617/D7617M replaces ACI 440.3R-04 Method B.4.
Bent bar capacity	—	B.5	No existing ASTM test method available.
Durability properties	—	B.6	No existing ASTM test method available.
Fatigue properties	D3479	B.7	The ACI method provides specific information on anchoring bars in the test fixtures and on attaching elongation measuring devices to the bars. The ACI method also requires specific calculations that are not provided in the ASTM method.
Creep properties	D7337/D7337M	—	ASTM D7337/D7337M replaces ACI 440.3R-04 Method B.8.
Relaxation properties	D2990 E328	B.9	The ACI method provides specific information on anchoring bars in the test fixtures and on attaching elongation measuring devices to the bars. The ACI method also requires specific calculations that are not provided in the ASTM method.
Anchorage properties	—	B.10	No existing ASTM test method available.
Tensile properties of deflected bars	—	B.11	No existing ASTM test method available.
Effect of corner radius on strength	—	B.12	No existing ASTM test method available.
Flexural properties	D790 D4476	—	No ACI method developed.
Coefficient of thermal expansion (CTE)	E831 D696	—	No ACI method developed.
Glass transition temperature	E1356 E1640 D648 E2092	—	No ACI method developed.
Volume fraction	D3171 D2584	—	No ACI method developed.
Direct tension pull-off	D7522/D7522M	—	ASTM D7522/D7522M replaces ACI 440.3R-04 Method L.1.
Tensile strength and modulus	D7565/D7565M	—	ASTM D7565/D7565M replaces ACI 440.3R-04 Method L.2.
Lap shear strength	D7616/D7616M	—	ASTM D7616/D7616M replaces ACI 440.3R-04 Method L.3.
Bond strength	D4551 C882	—	No ACI method developed.

Tabla 3.1.- Métodos de ensayo para barras utilizadas para reforzar o pretensar hormigón (ACI 440.3R-12, 2012).

Concretamente, se ha decidido ensayar con tratamiento superficial consistente en barras corrugadas y con recubrimiento de arena, ambas con tratamiento superficial que colabora activamente, tal como se ha detallado anteriormente, en la movilización de la adherencia.

---

Previamente a la realización de los ensayos de pullout, se procede a la determinación de la dosificación del hormigón elegida y las características de sus materiales.

También será preciso, con carácter preliminar, establecer las características geométricas de las barras.

Para completar el estudio, se realizarán ensayos mediante microscopía óptica, SEM y AFM, que aporten información sobre las consecuencias de las altas temperaturas en las barras de CFRP antes y después de los ensayos de pullout.

## **3.2 Desarrollo del plan experimental**

Esta investigación ha requerido la utilización por largos períodos de tiempo de diversas instalaciones. Ello propició que se ajustara cuidadosamente la secuencia de ensayos a realizar, los acopios y las estancias en cámaras a las necesidades y posibilidades de los equipamientos.

### **3.2.1 Planificación**

El plan de trabajo desarrollado para estudiar el comportamiento adherente entre las barras de CFRP y el hormigón en diferentes condiciones térmicas en el tiempo, se ha llevado a cabo mediante unos ensayos previos, ensayos de pullout, ensayos de resistencia a compresión del hormigón y ensayos de microscopía óptica, SEM y AFM.

Ello implicó la organización de los trabajos a realizar con antelación.

Los ensayos previos se plantearon al inicio de la investigación, y sus resultados sirvieron para fijar las condiciones de los siguientes.

Con ello, se inició la planificación temporal y de acopios que se detalla a continuación.

Los datos necesarios para abordar la influencia de temperatura en la adherencia de las barras CFRP con el hormigón han sido los resultantes de los ensayos de Pullout. Se planteó, considerando las posibilidades e infraestructuras disponibles, una serie de 81 ensayos de pullout, correspondientes a 3 muestras por tipo de barra (CFRP Arenadas, CFRP Corrugadas y Acero), por edad de ensayo (28, 60 y 180 días) y por condiciones térmicas (20 °C, 50 °C y 80 °C).

Se realizaron familias de 3 probetas por ensayo de cada tipo de barra, a las tres temperaturas mencionadas y siendo las edades de rotura a 28, 60 y 180 días para cada familia. Con ello, se ha podido comprobar la evolución de la adherencia de las barras en el hormigón en un período suficientemente avanzado como para que el endurecimiento hubiese alcanzado su máxima resistencia a compresión, y las condiciones ambientales impuestas tuvieran una duración conveniente para estudiar su efecto continuado en la pieza de hormigón armado.

Para determinar la influencia en la adherencia de la resistencia a compresión del hormigón y su afectación por las altas temperaturas, se realizaron ensayos de rotura a compresión de probetas cúbicas de 100x100x100mm en cada amasada de hormigón. Con ello, se ha podido correlacionar los resultados obtenidos, extrayendo conclusiones acerca de cómo influye a la adherencia de las barras de CFRP la resistencia del hormigón.

Para ello, se previó la utilización una cámara de curado, una cámara climática de condición 50 °C y una cámara climática de 80 °C, prensa para los ensayos de tracción y pullout, y prensa para rotura a compresión del hormigón; todo este equipamiento ubicado en el Laboratorio del Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación de la Universidad Politécnica de Valencia.



Debido a la labor investigadora del Departamento, ha sido esencial la planificación anticipada de espacios, sobre todo en los ensayos de mayor duración, los de seis meses en cámara (180 días). Además, la secuencia de los diferentes ensayos, ha condicionado por casi un año la utilización de estas instalaciones, lo que ha supuesto un esfuerzo de coordinación relevante.



Fig. 3.1.- Cámara de Curado, Laboratorio Dep. Construcciones Arquitectónicas, ETSIE, UPV.

Es importante precisar que, como se ha comprobado en la revisión bibliográfica (Achillides et al., 2004; Davalos et al., 2008) las diferencias de resultados obtenidos en roturas por pullout a temperaturas entre 20 °C y 50 °C no son considerables. Por ello, y queriendo tener el contraste de esta temperatura en el estudio, se ha introducido la variable de humedad en las muestras que han permanecido a 20 °C. Como se expone a continuación, a la temperatura de 20 °C se ha provocado la saturación de humedad en las muestras.

Resulta sintomático la ausencia de estudios acerca de la influencia de la humedad en la adherencia de las barras de CFRP, y aun sin ser el objetivo principal de este estudio, sí es imprescindible

conocer el grado de alcance que puede llegar a tener. Así, las probetas pullout de todas los tipos estudiados, y en todas sus edades (28, 60 y 180 días), se mantuvieron en la cámara de curado con las muestras saturadas de humedad, en contraste con las que estuvieron a 50 °C y las de 80 °C, totalmente secas sin humedad en su interior.

Esta diferencia en las humedades a las que se sometió a las diferentes probetas, combinadas con las de la temperatura, aportaron una información interesante, que se analiza más adelante.

De igual modo, se realizó la planificación temporal de las amasadas y de las roturas, pues en ambos casos, el laboratorio quedaba muy condicionado al confeccionar tandas de 27 probetas de pullout y sus respectivas probetas de control para resistencia compresión del hormigón.

Además de las instalaciones del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la UPV, se utilizaron los equipos de microscopía óptica del Laboratorio de Materiales de la UPV; También se realizaron ensayos de microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía de fuerza atómica (AFM) de las muestras ensayadas a pullout en el Laboratorio de Microscopía Electrónica, del Departamento de Física Aplicada de la UPV.



Fig. 3.2.- a) Microscopio óptico, b) Microscopio Barrido Electrónico y c) Microscopio de Fuerza Atómica. UPV (Elaboración propia, 2016)

---

En ambos casos, la planificación se integró en el programa inicial, con la reserva oportuna de dichas instalaciones.

Con relación a las barras, no hubo problema alguno para el acopio de barras de acero corrugado, fabricadas por Corrugados Azpeitia. En cuanto a las barras de CFRP, fueron solicitadas a las empresas fabricantes:

- Barras CFRP Corrugadas (Ø 12mm): Marshall Composites.
- Barras CFRP Arenadas (Ø 14mm): Pulltrall Inc.

En ambos casos, las empresas fabricantes aportaron desinteresadamente las barras a esta investigación; Así, las barras de CFRP Arenadas fueron suministradas por Pulltrall Inc., y las barras de CFRP Corrugadas por Marshall Composites Technologies LLC; la anticipación en los pedidos permitió cumplir con la planificación inicial.

### 3.2.2 Tratamiento de datos

La complejidad que puede suponer para una investigación el manejo de cuantiosos datos obtenidos a partir del software que incorporan los equipos de rotura obliga a reflexionar acerca del modo más productivo y exacto a aplicar para obtener unos resultados fiables.

Dada la inexistencia de aplicaciones específicas para el adecuado tratamiento de datos, se planificaron las rutinas necesarias a implementar en cada caso para un mayor aprovechamiento de la cantidad de datos, así como del tiempo necesario para su adecuada manipulación.

Con relación a los resultados de los ensayos de pullout, dada su magnitud, con listados de más de 3.500 líneas de lectura de deslizamientos de barra en hoja de cálculo generada en formato MS Excel (Microsoft®) por la prensa de ensayo de pullout y su interfaz, la

operativa para procedimentar el tratamiento de datos se concretó con la implementación de una serie de algoritmos, funciones y gráficos (“script”) sobre la aplicación Matlab (R2014b, de MathWorks<sup>©</sup>) que facilitaron el análisis, aportando rigor y exactitud al proceso, que se adjunta a esta tesis doctoral.

En la planificación de la tesis, se destinó un tiempo dedicado exclusivamente a la compilación y tratamiento de los datos directos obtenidos, así como a la creación de diferentes “scripts”<sup>3</sup> que sirvieron para facilitar el análisis, corregir los pequeños errores generados durante la medición en los ensayos y, finalmente, generar los gráficos que representan dichos resultados.

Se concretó la elaboración los siguientes “scripts”, a partir de las tablas MS Excel generadas durante los ensayos de Pullout (Fig. 3.3):

- Obtención de tensión máxima, tensión adherente en 0.01, 0.1 y 1 mm, respectivamente y los deslizamientos producidos en extremo no tensionado y extremo tensionado, en adelante, ENT y ET, respectivamente, creando un script diferente para cada tipo de barra.
- Generación de gráficas con tensión adherente para valores de deslizamientos en el ENT y en el ET para cada tipo de barra, temperatura y edad.
- Generación de gráficas comparativas de tensión adherente y deslizamientos en ENT y ET para cada barra, a una determinada edad.
- Generación de gráficas comparativas de tensión adherente y deslizamientos en ENT y ET para cada barra, a una determinada Temperatura.

---

<sup>3</sup> *Un script es un conjunto de instrucciones almacenadas en un archivo, que se utilizan para automatizar tareas. Se puede implementar como un "programa principal" para ejecutar una determinada aplicación (Echevarría, 2014).*

- 
- Generación de gráficas combinadas por tipología, edades y comparación entre ellas

Se acompañan en el *Anexo II* una compilación de los “*scripts*” creados, como aporte al procesado de los datos en futuras investigaciones.

```

167
168 % TENSION ADHERENTE
169
170 for i=2:m
171     D(i,20)=D(i,2)*1000/cb/la;
172     W=[D(i,17),D(i,18),D(i,19)];
173
174     z=3-numel(W(W==0));
175     D(i,21)=(D(i,17)+D(i,18)+D(i,19))/z;
176
177 end
178 |
179
180 % CALCULA DEFORMACIÓN ET
181
182 etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z
183
184 sc=nn*1000*lf/(el*ab)
185
186 % CALCULA DEFORMACIÓN ET restando la deformación elástica de la barra
187
188 etf=etm-sc
189 % TENSION ADHERENTE MÁXIMA
190
191 t=nn*1000/cb/la
192
193
194 % RESULTADO TENSION MÁXIMA
195
196 % CALCULA DEFORMACIÓN ENT
197
198 ent=D(p,16)
199
200 % CALCULA DEFORMACIÓN ET
201
202 etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z
203
204 sc=nn*1000*lf/(el*ab)
205
206 % CALCULA DEFORMACIÓN ET restando la deformación elástica de la barra
207
208 etf=etm-sc
209
210 % TENSION ADHERENTE MÁXIMA
211 fprintf('Tensión Adherente')
212 t=nn*1000/cb/la
213 z
214 M=[nn,t,ent,etf]
215
216 % TENSION MEDIA
217 t1;
218 t2;
219 t3;

```

Fig. 3.3.- Captura de pantalla parcial de *script* para cálculo de tensiones en 0.01, 0.1, 1 mm, respectivamente, tensión adherente máxima, alargamientos en extremos no tensionado y tensionado, respectivamente. Realizado con Matlab© (Elaboración propia, 2016).

### 3.3 Características de los materiales empleados

#### 3.3.1 Hormigón

El hormigón que se ha utilizado en esta investigación es un HA-30/B/20/I, elaborado con los siguientes componentes:

##### 3.3.1.1. Cemento

El cemento utilizado en la fabricación de las todas las amasadas de esta investigación ha sido el CEM I 52,5 R, de CEMEX. Las propiedades mecánicas según UNE EN 196-1 se dan en la Fig. 3.4.

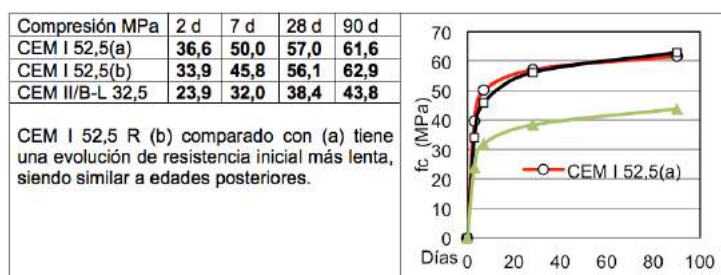


Fig. 3.4.- Gráfica con ensayos de cemento utilizado en la tesis, (elaborada en Laboratorio Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas UPV, 2016)

##### 3.3.1.2. Áridos

Los áridos empleados en la fabricación del hormigón han sido una arena (con dos fracciones granulométricas definidas) y gravas trituradas calizas de la misma cantera (Fig. 3.5).

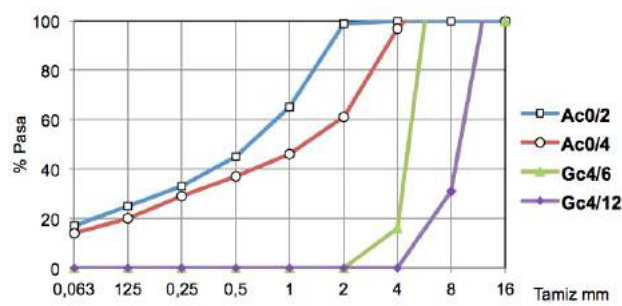


Fig. 3.5.- Granulometría de los áridos (% Pasa). (elaborada en Laboratorio Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas UPV, 2016)

3.3.1.3. *Superplastificante.*

El superplastificante empleado ha sido Sika Viscocrete 3425, policarboxilato modificado en una base de agua. La dosificación escogida estuvo en el rango de los valores recomendados por el fabricante, situada entre el 0,45% y 1,40% del peso del conglomerante.

Con todo ello, se planteó la dosificación siguiente (Tabla 3.2):

DOSIFICACIÓN HA-30/B/20/I	
Componente	Kg por m <sup>3</sup>
Cemento	300,00
Agua	195,00
Grava	1107,00
Arena	738,00
Aditivo	1,35

Tabla 3.2.- Dosificación del Hormigón utilizado en la investigación (Elaboración propia, 2016)

La fabricación del hormigón se realizó en hormigonera de eje vertical ubicada en el propio laboratorio de Materiales de



Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la UPV, con capacidad para 70 lt.

El acopio de áridos se realizó en la parte exterior, protegido de humedad y luz del sol. Todos los trabajos se ejecutaron en el mismo ámbito, evitando desplazamientos que pudieran provocar segregación del hormigón fabricado.

### 3.3.2 Barras de Acero

Las barra de acero utilizadas han sido B 500 SD de 12 mm de diámetro, fabricadas por Corrugados Azpeitia. La nomenclatura adoptada en este plan experimental para estas barras es ACC12. Las propiedades definidas por el fabricante se recogen en la Tabla 3.3.

Propiedades	ACC 12
Diámetro nominal (mm)	12
Área nominal (mm <sup>2</sup> )	117,83
Tensión Máxima (Mpa)	575-843
Tensión a límite elástico (Mpa)	500-625
Módulo elástico (Gpa)	200
Alargamiento carga máxima (%)	≥ 8

Tabla 3.3.- Valores medios de las propiedades definidas por el fabricante para las barras de acero corrugado ACC 12 (Elaboración propia).

### 3.3.3 Barras de CFRP

Como se ha anticipado, las barras de CFRP utilizadas en esta investigación han sido de dos tipos: barras corrugadas y barras con recubrimiento de arena. La elección de estos tipos es por ser los más utilizados y disponibles en el mercado.

### 3.3.3.1. Barras de CFRP Corrugadas

Están compuestas por una matriz polimérica de viniléster reforzada con fibras de carbono. El diámetro utilizado ha sido de 12 mm, siendo la nomenclatura adoptada en este estudio para esta barra FCC 12. El fabricante es Marshall Composites Technologies LLC, y en la tabla 3.4. se reflejan las propiedades que definen para ellas.

DATOS ENSAYO: Barra Corrugada d12 mm	
PARÁMETRO	MEDIA
Diámetro mayor sin corruga (mm)	10,73
Diámetro menor sin corruga (mm)	9,81
Diámetro medio sin corruga (mm)	10,32
Diámetro equivalente (mm)	10,62
Área equivalente (mm <sup>2</sup> )	88,53
$a_m$ (mm)	0,53
$c$ (mm)	7,93
$\alpha$	24,20
$\beta$	70,50
$e_1$	1,38
$e_2$	1,41
$b$ (mm)	1,20
$d$ (mm)	3,51

Tabla 3.4.- Propiedades definidas por el fabricante para la barra de CFRP Corrugada FCC 12  
(Elaboración propia, 2016)

### 3.3.3.2. Barras de CFRP arenadas

Compuestas por matriz polimérica de viniléster y reforzada con fibras de carbono, la adherencia se consigue mediante un recubrimiento de arena de sílice. El diámetro utilizado ha sido de 14

mm, del fabricante Pulltrall INC, que especifica las propiedades recogidas en la Tabla 3. 5.

DATOS ENSAYO: Barra Arenada d14 mm	
PARÁMETRO	MEDIA
Diámetro con geometría superficial (mm)	14,50
Diámetro sin geometría superficial (mm)	12,71
Diámetro equivalente (mm)	13,70
Área equivalente (mm <sup>2</sup> )	147,10
$a_m$ (mm)	0,91
Diámetro grano arena (mm)	0,2-2,0

DATOS FABRICANTE: PULLTRALL INC.	
PARÁMETRO	MEDIA
Área nominal (mm <sup>2</sup> )	126,70
Diámetro nominal (mm)	12,70

Tabla 3.5.- Propiedades definidas por el fabricante para la barra de CFRP Arenada FCA 14  
(Elaboración propia, 2016)

### 3.4 Ensayos previos

Para acometer con garantías los ensayos de Pullout se procedió a realizar ensayos de ajuste de la dosificación del hormigón y garantizar la resistencia a compresión, parámetro este que resulta determinante en la adherencia de las barras de CFRP al hormigón.

#### 3.4.1 Ensayos para ajuste de dosificación del hormigón

Para fijar una dosificación que permitiera evaluar la influencia de las altas temperaturas en la adherencia, se plantearon unos ensayos previos que, al mismo tiempo, establecieran la cantidad de hormigón a

realizar en cada amasada y poder planificar adecuadamente los acopios y espacios en laboratorios.

Dado que la capacidad de la amasadora de eje vertical es de 70 l, se estimó que la manera de conseguir mayor homogeneidad en las muestras, en función de los medios disponibles sería realizar una amasada por cada tipo de barra y edad, fabricándose 9 probetas de tipo pull-out, según norma UNE-EN 10080, y 9 probetas cúbicas de 100x100 mm, según norma UNE-EN 12390-2.

El procedimiento de fabricación consistió en:

1.- Determinación de la humedad de los áridos, previamente al amasado de la mezcla, con el fin de evitar variaciones en los parámetros del hormigón debido al agua que aportan los áridos. Se realizaron ensayos para la arena y para la grava. Se cuidó especialmente el acopio, realizándolo 48h antes de las amasadas, y aportando humedad para regularizar el estado de los componentes.

2.- Se procedió al amasado, vertiendo los áridos y el filler. Se amasaba en seco durante 1 minuto.

3.- Se añadía el cemento y se amasaba durante 1 minuto.

4.- Se añadía el 50% del agua y se amasaba durante 2 minutos.

5.- Seguidamente, se añadía el 50% de agua restante junto con todo el aditivo superplastificante, amasándose durante 5 minutos.

Se realizó una amasada previa en la que se ajustaron las cantidades de superfluidificante y la cantidad de agua, en función de la humedad de los áridos, que se situó en el intervalo 1,8% a 2,1% en árido fino y 0,7% a 1% en árido grueso, siendo satisfactorias las resistencias obtenidas a compresión, por lo que se fijó definitivamente la dosificación.

---

### 3.5 Ensayos de Pullout

Dado que esta tesis trata acerca de la adherencia ante elevadas temperaturas y períodos largos de tiempo, el ensayo de pullout será el idóneo para poder determinar aquellos parámetros que ayuden a estudiar adecuadamente el comportamiento de las barras al ser solicitadas a tracción de manera que únicamente la adherencia con el hormigón impida su desplazamiento.

Se utilizó para la ejecución del ensayo las indicaciones de la norma ACI.440.3R-12 B.3, si bien se introdujeron ciertas modificaciones que, sin influir en el resultado, ha facilitado su ejecución y medición. Concretamente, se eliminó la lámina elástica entre probeta y placa de apoyo, para una más exacta medición del desplazamiento del extremo tensionado de la barra, es decir, aquél sobre el que se está aplicando la fuerza. Asimismo, se limitó la longitud máxima de las probetas de CFRP a 750 mm por requerimiento de la máquina de ensayo utilizada. Por último, debido a la forma de moldes utilizados, se modificó la dirección del vertido del hormigón, realizándolo de manera perpendicular a la dirección de la barra.

El ensayo consistió en la aplicación de una fuerza de tracción en el extremo de la barra embebida en una probeta cúbica de 200 x 200 mm de hormigón, dejando la longitud especificada en norma ( $l_a$ ) en contacto entre ambos materiales, encargada de oponerse al arrancamiento inducido, colocando una cánula de PVC en el resto de barra en el interior de la probeta, para evitar el contacto con el hormigón. Es especialmente relevante cuidar la preparación de la muestra con rigor para conseguir que sea exactamente la longitud requerida para el ensayo, y no más, lo que lo desvirtuaría. Esta longitud adherente dependía del tipo de tratamiento superficial de la barra y su diámetro nominal.

Los datos que ofrece este ensayo permiten calcular la tensión adherente y los desplazamientos en ambos extremos de la barra. Es interesante considerar que, en función de la elasticidad de la barra, el extremo tensionado sufrirá un mayor desplazamiento, pues sumará al propio debido al desplazamiento dentro de la probeta del hormigón su propio alargamiento en función de su módulo de elasticidad.

Los datos calculados fueron:

Tensión Adherente ( $\tau$ ):

$$\tau = \frac{F}{C_b \cdot l_a}$$

Deformación elástica de la barra ( $S_c$ ):

$$S_c = \frac{F \cdot L_c}{E_L \cdot A}$$

*F: Fuerza aplicada a la barra (N)*

*C<sub>b</sub>: Perímetro de la barra (mm)*

*L<sub>c</sub>: Longitud entre punto medio de sujeción de captadores e inicio de longitud adherente (mm)*

*l<sub>a</sub>: Longitud adherente (mm)*

*E<sub>L</sub>: Módulo elástico de la barra (MPa)*

*A: Área resistente de la barra (mm<sup>2</sup>)*

Con carácter previo, se calcularon el resto de parámetros dependiendo de la barra y no del ensayo: Diámetro, área, perímetro, área resistente y módulo elástico.

La siguiente cuestión fueron la condiciones ambientales que precisamos en nuestra investigación.

---

Con relación a la humedad, se determinó emular la situación real que cabría encontrar en cada rango de temperatura, considerando cercana al 90% a 20° C y despreciable en las estufas a 50° C y 80° C.

Para constatar la evolución de la adherencia a una determinada temperatura en el tiempo, se establecieron 3 edades de estudio: 28, 60 y 180 días.

En todos los casos, se fijó un período de 3 días en cámara de curado desde la fabricación de la probeta hasta su colocación en ambiente y temperatura definitivos, garantizando así el curado del hormigón y el desarrollo de las resistencias iniciales que cabría esperar en el modelo real.

Según lo especificado en el apartado de ensayos previos, se utilizó un hormigón de 30 Mpa de resistencia a compresión con las especificaciones descritas en el apartado 3.3.1., página 96.

Para comprobar la resistencia alcanzada en cada amasada, así como en cada una de las condiciones ambientales propuestas, se realizaron probetas de 100x100x100 mm, determinando las resistencia media según el artículo 86.3.2. de la EHE-08, por el que se realiza la conversión de resistencia obtenida al ensayar una probeta prismática, en vez de la normalizada cilíndrica.

Con relación a las barras, se han ensayado: barra de acero de 12 mm de diámetro (d12), barra de CFRP arenada de diámetro 14 mm (d14) y barra de CFRP corrugada de 12 mm de diámetro (d12).

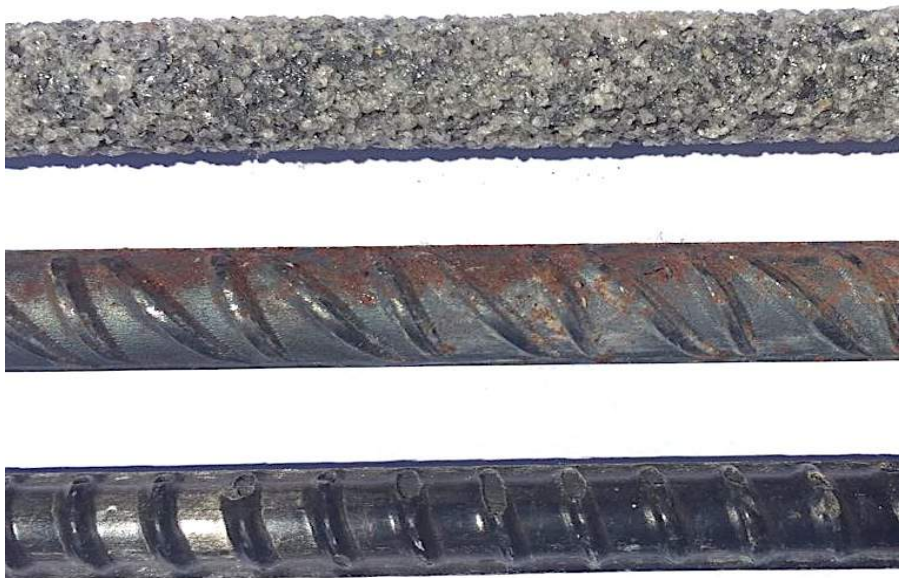


Fig. 3.6.- Barra CFRP arenada d14 (*arriba*), acero d12 (*centro*) y CFRP corrugada d12 (*abajo*).

Para asegurar que la longitud adherente ( $l_a$ ) se limita a lo establecido por tipo de barra y diámetro se dispuso de una cánula a base de tubo de P.V.C corrugado de la marca LEXMAN de 25 mm de diámetro, resistente a temperaturas entre  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $90^{\circ}\text{C}$ .

La elección de las barras se hizo de manera aleatoria, procediendo a cortar una longitud de 750 mm por limitaciones de la prensa, tal como se ha descrito con anterioridad. Una vez seleccionadas por material y tipo de tratamiento superficial, se procedió a condicionar la longitud adherente a la establecida para el ensayo de pullout, según las dimensiones de la Tabla 3.6.



Tipo Barra	$L_{adh}$ (mm)	$L_{cánula}$ (mm)
ACC12	61	139
CA14	69	131
CC12	54	146

Tabla 3.6.- Longitudes de Adherencia y Cánula por tipo de barra.

Cortada una sección de cánula de PVC corrugado, se fija a la barra mediante cinta adhesiva (Fig. 3.7) y se introdujo la barra en el molde, colmatando el hueco entre barra y molde mediante tapones perforados de corcho confeccionados al efecto (Fig. 3.8).



Fig. 3.7.- Barra de CFRP Arenada con cánula PVC para limitar la Longitud adherente ( $l_a$ )

Para la elaboración de las probetas de hormigón se utilizaron moldes de pullout siguiendo lo indicado en ACI.440.3R-12 y UNE-EN 12390-1. Ello implicó, como se menciona en la página 101, una modificación en la dirección del hormigonado, pero a cambio se consigue que la cara que estará en contacto con la placa de ensayo no precisa ser pulida ni refrentada, pues es una de las caras del molde, quedando la abierta, y por ello irregular, en un lateral de la probeta (Fig. 3.8).



Fig. 3.8.- Molde de Pullout preparado para hormigonar, con la barra dispuesta, la cánula que garantiza la adherencia barra/hormigón en lc, tapones de ajuste colocados y desencofrante aplicado.

La captación de los desplazamientos requiere colocar dispositivos en ambos extremos de la probeta, donde encontraremos un extremo tensionado (la parte de la barra que está sujeta directamente a la prensa) y otro extremo no tensionado, en el lado contrario de la probeta.

Para medir con precisión los desplazamientos en el extremo tensionado, se colocó una pieza específica de sujeción, fijada a la barra mediante tres tornillos que forman  $120^\circ$  entre sí (Fig. 3.9). Se cuidó especialmente la equidistancia de cada tornillo a la barra para garantizar que el dispositivo quedara centrado respecto a la misma, consiguiendo así minimizar las diferencias en las distancias hasta la placa, resultando la media una medida fiable. Es importante determinar adecuadamente esta distancia pues este extremo de la barra está tensionado, y por ello, con deformación de la barra, además del desplazamiento en el interior del hormigón de la probeta.

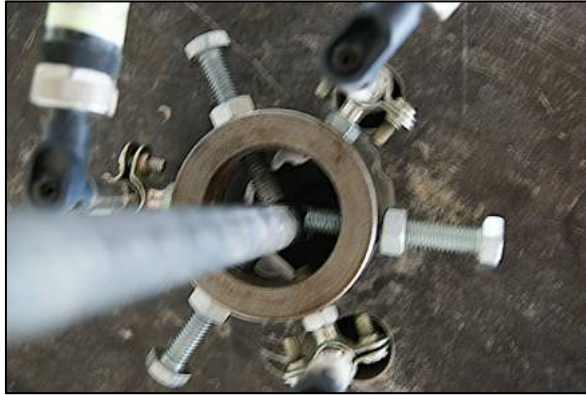


Fig. 3.9.- Dispositivo para sujeción de los tres captadores que medirán el desplazamiento del extremo tensionado durante el ensayo pullout.

En la Fig. 3.9 se observa el dispositivo que permite la fijación de tres captadores (LVDT) Schreiber modelo SM222.20.2.S.

En el extremo no tensionado de la barra se colocó un captador LVDT de la marca HBM Tipo WA/50mm, tal como se observa en la Fig. 3.10.



Fig. 3.10.- Captador LVDT en extremo no tensionado de la barra en el ensayo de pullout.

Para la conservación de las probetas en las condiciones de temperaturas especificadas, se utilizaron los siguientes equipamientos:

- Cámara de curado.- Es el lugar donde permanecieron todas las probetas sus primeras 72 h, con unas condiciones de 20° C y > 95% de Humedad Relativa.



Fig. 3.11.- Cámara de curado.

- Cámara climática a 50° C.- De la marca CTS, modelo CW10/4. Utilizada para conservar en las condiciones especificadas las probetas de pullout y los testigos de compresión del hormigón.



Fig. 3.12.- Cámara climática a 50° C.

- Cámara climática a 80° C.- Utilizada para conservar en las condiciones especificadas las probetas de pullout y los testigos de compresión del hormigón.



Fig. 3.13.- Cámara climática a 80° C.

Para los ensayos de rotura por pullout se utilizó la prensa Ibertest modelo UIB 600 DAU, adaptada a la placa utilizada (Fig. 3.13), con módulo MBM Spider para LVDT (Fig. 3.14).



Fig. 3.15.- Prensa de ensayo pullout Ibertest UIB 600 DAU.

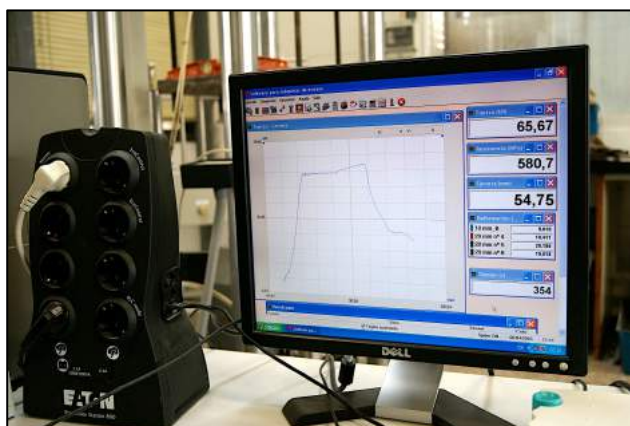


Fig. 3.16.- Modulo MBM Spider y software de representación gráfica para la lectura de los LVDT durante el ensayo de pullout.

Para la rotura a compresión de las probetas de hormigón se utilizó la prensa Ibertest modelo MEI-1500-SW.



Todos los equipamientos utilizados pertenecen al Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universitat Politècnica de València, en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación.

Así pues, tras la preparación de los materiales y componentes necesarios para el ensayo, se procedió a fabricar el hormigón según la dosificación y resistencias descritas en el apartado 3.3.1.

---

Siguiendo las instrucciones recogidas en la norma UNE –EN 12350-2 se ensayó la consistencia mediante cono de Abrams, realizando los ajustes oportunos hasta conseguir la prescrita.

Se realizó el llenado de los moldes para ensayos de pullout y compresión, compactando con vibrador eléctrico, y enrasando con barra hasta conseguir superficie lisa y brillante.

Tras llenar todos los moldes de la tanda a ensayar, se cubren con lámina de PVC para garantizar la hidratación. Tras 24h horas se procede al desmoldado y se llevan a la cámara de curado durante 72h.

Antes de introducir a la cámara de curado, se codifican las probetas para su adecuada identificación. Se ha seguido el siguiente criterio:

**TIPO BARRA / DÍAS / TEMPERATURA / LETRA PROBETA**

*Tipo Barra: ACC, FCA y FCC*

*Días: 028, 060 y 180*

*Temperatura: 20° C, 50° C y 80° C*

*Letras Probeta: A, B y C*

Además, en cada probeta se anota: **FECHA FABRICACIÓN, N° LOTE y FIRMA.**

A modo de ejemplo, se presenta en la Fig. 3.15 una probeta ya ensayada, cuya codificación es:

**FCA 028 / 80 C**

**Barra de CFRP Arenada, a 28 días, a 80° C, probeta “C”**

Fabricada el 2 de junio de 2015, Lote 1, por FC (*Fernando Cos-Gayón*)



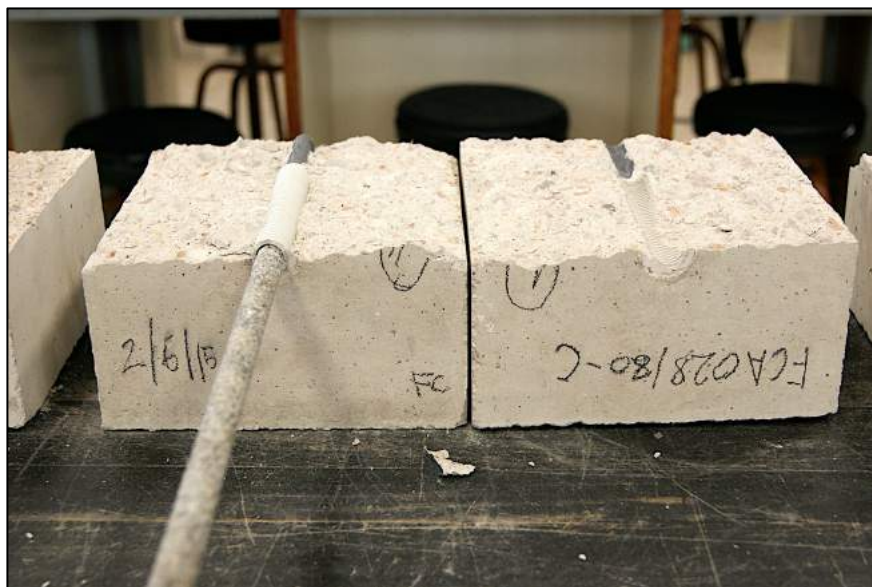


Fig. 3.17.- Identificación de probetas de pullout, ejemplo FCA 028/80-C.

Así, en el tiempo establecido en esta investigación para cada tipo de barra y temperatura se procedió a la rotura por pullout de cada una de las probetas, lo que generó unos datos tomados por la prensa y los LVDT, que se exportaron como ficheros .xls y que se trataron posteriormente con MATLAB.

Seguidamente se ensayaron a compresión las probetas testigo, lo que nos permitieron relacionar los datos de resistencia a compresión del hormigón con la tensión adherente.

A continuación, se aportan los datos de ambos ensayos, los obtenidos en los pullout y los de resistencia.

En las tablas que siguen se presentan los resultados de resistencia a compresión del hormigón, la tensión máxima, la tensión normalizada de cada probeta, así como los desplazamientos en cada extremo y resultado de lote.



Además de los datos obtenidos por la rotura, se ha incluido una columna para cada probeta con el modo de rotura, según lo siguiente:

**PO:** Se trata de una rotura en la que se produce una vez agotado el acuíñamiento o rozamiento entre barra y hormigón.

**RA:** Se produce por rotura de la adhesión entre la geometría superficial y el núcleo de la barra.

**RC:** Es una combinación de las roturas anteriores, con presencia parcial de resistencia por adherencia o acuíñamiento, pero daños en otras partes de la barra. Se da en barras de CFRP corrugadas, en las que algunas corrugas han soportado el esfuerzo, mientras otras han sido cortadas.

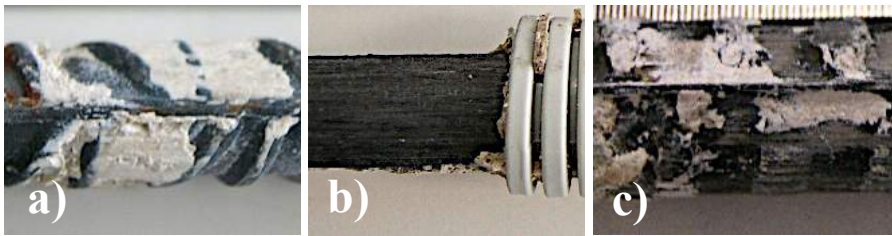


Fig. 3.18.- Tipos de rotura: PO (a), RA (b) y RC (c).

3.5.1 Ensayos de Pullout con Barras de Acero

Se presentan en la Tabla 3.7 los datos de cada probeta, su tipo, periodo en el que ha permanecido en la cámara y temperatura a la que ha estado sometida. Se aportan la resistencia a compresión del hormigón, la tensión máxima, la tensión normalizada (que resulta de dividir la tensión máxima por la raíz cuadrada de la resistencia del hormigón) y el modo de rotura.

TIPO BARRA	TIEMPO (Días)	TEMPERATURA (°C)	PROBETA	AMASADA	$I_{\text{gravedad}}$	$f_{\text{c, max}}$ (MPa)	$T_{\text{max}}$ (MPa)	$T_{\text{max}} / \sqrt{f_{\text{c}}}$ (MPa)	TIPO ROTURA
ACC12	28 días	20°C	A	1	19,06	32,56	14,3470	2,5143	PO
			B	1	17,65	32,56	13,4585	2,3586	PO
			C	1	19,55	32,56	10,3788	1,8189	PO
		50°C	A	1	18,59	30,29	10,3116	1,8736	PO
			B	1	18,33	30,29	10,1491	1,8441	PO
			C	1	16,65	30,29	11,8848	2,1594	PO
		80°C	A	1	17,38	27,68	11,0061	2,0919	PO
			B	1	16,82	27,68	11,2360	2,1356	PO
			C	1	17,76	27,68	10,7641	2,0459	PO
	60 días	20°C	A	4	19,00	34,88	14,6735	2,4845	PO
			B	4	19,50	34,88	16,9031	2,8621	PO
			C	4	18,00	34,88	16,5525	2,8027	PO
		50°C	A	4	19,00	31,95	14,9396	2,6430	PO
			B	4	20,00	31,95	14,0138	2,4793	PO
			C	4	19,50	31,95	15,3394	2,7138	PO
		80°C	A	4	22,50	29,37	17,3628	3,2038	PO
			B	4	19,00	29,37	16,2946	3,0067	PO
			C	4	19,00	29,37	16,9450	3,1267	PO
	180 días	20°C	A	7	22,00	46,71	25,4611	3,7254	PO
			B	7	20,50	46,71	28,4025	4,1558	PO
			C	7	20,50	46,71	29,0645	4,2526	PO
		50°C	A	7	19,00	36,65	26,7895	4,4251	PO
			B	7	22,00	36,65	26,5189	4,3804	PO
			C	7	19,50	36,65	27,9782	4,6215	PO
		80°C	A	7	20,20	33,80	25,9217	4,4587	PO
			B	7	20,50	33,80	26,2554	4,5161	PO
			C	7	20,10	33,80	22,8039	3,9224	PO

Tabla 3.7.- Datos de ensayos de pullout de las barras de acero

En la Tabla 3.8 se presentan los resultados de ensayo de las barra de acero en todas las edades y temperaturas ensayadas, reflejando la tensión con deslizamientos de 0,01 mm, 0,1 mm y a 1 mm, los desplazamientos en extremo no tensionado ( $\delta_{ENT}$ ), extremo tensionado ( $\delta_T$ ), tensión máxima y tensión media.

TPO. BARRA	TIEMPO (Días)	TEMPERATURA (°C)	PROBETA	AMASADA	T <sub>res.</sub> 0,01 mm (MPa)	T <sub>res.</sub> 0,1 mm (MPa)	T <sub>res.</sub> 1 mm (MPa)	T <sub>res.</sub> (MPa)	$\delta_{ENT}$ (mm)	$\delta_T$ (mm)	$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (MPa)	$\sigma_{med}$ Normal. (MPa)	TPO. ROTURA
ACC12	28 días	20°C	A	1	6,2251	9,6486	14,3470	10,0736	1,0624	1,6636	12,73	2,23	PO
			B	1	2,9019	4,5177	13,4585	6,9594	1,3019	1,5066			PO
			C	1	1,8067	2,8603	10,3788	5,0153	1,7540	2,5285			PO
		50°C	A	1	2,1965	4,7502	10,3116	5,7528	1,1548	1,7716	10,78	1,96	PO
			B	1	1,5801	5,1643	10,1491	5,6312	0,6644	1,0139			PO
			C	1	1,7929	5,2281	11,8848	6,3019	1,0623	0,9563			PO
		80°C	A	1	2,4272	5,5527	11,0061	6,3287	0,7648	1,6568	11,00	2,09	PO
			B	1	2,6798	5,8753	11,2360	6,5970	0,9067	-			PO
			C	1	3,2474	7,1443	10,7641	7,0519	1,0645	1,1801			PO
	60 días	20°C	A	4	4,7727	10,7063	14,6735	10,0508	0,8709	1,3448	16,04	2,72	PO
			B	4	4,3182	11,0710	16,9031	10,7641	1,1785	2,2769			PO
			C	4	4,6697	10,6044	16,5525	10,6089	0,8034	1,4629			PO
		50°C	A	4	3,9980	9,6791	14,9396	9,5389	0,6981	1,5160	14,76	2,61	PO
			B	4	3,1002	8,5185	14,0138	8,5442	0,8565	2,4824			PO
			C	4	2,1823	7,5608	15,3394	8,3608	1,1389	2,1737			PO
		80°C	A	4	4,7894	10,2571	17,3628	10,8031	0,9028	2,1107	16,87	3,11	PO
			B	4	0,7978	2,7310	16,2946	6,6078	1,4068	2,1061			PO
			C	4	9,1929	9,9429	16,9450	12,0269	1,3936	-			PO
	180 días	20°C	A	7	6,1881	16,8887	25,4611	16,1793	1,4183	-	27,64	4,04	PO
			B	7	8,6277	19,7370	28,4025	18,9224	1,5031	16,8438			PO
			C	7	9,6457	24,4049	29,0645	21,0384	1,5185	18,0985			PO
		50°C	A	7	4,7293	17,0044	26,7895	16,1744	1,1567	11,1280	27,10	4,48	PO
			B	7	3,9561	14,3601	26,5189	14,9450	1,0844	8,2845			PO
			C	7	8,8704	18,9424	27,8200	18,5443	1,2185	12,0108			PO
		80°C	A	7	9,8239	19,1243	25,9217	18,2900	0,9424	8,2845	24,99	4,30	PO
			B	7	8,6340	16,6614	26,2554	17,1836	1,0471	7,5769			PO
			C	7	4,5315	10,5620	22,8039	12,6325	1,2627	-			PO

Tabla 3.8.- Datos de ensayo de pullout de barras de acero, tensión con deslizamientos de 0,01 mm, 0,1 mm y a 1 mm, los desplazamientos en extremo no tensionado ( $\delta_{ENT}$ ), extremo tensionado ( $\delta_T$ ), tensión máxima y tensión media normalizada.

### 3.5.2 Ensayos de Pullout con Barras de CFRP arenadas

Los resultados de ensayos pullout de las barras CFRP arenadas se presentan en dos tablas. En la Tabla 3.9 se reflejan los datos de cada probeta, su tipo, periodo en el que ha permanecido en la cámara y temperatura a la que ha estado sometida. Se aportan la resistencia a compresión del hormigón, la tensión máxima, la tensión normalizada (que resulta de dividir la tensión máxima por la raíz cuadrada de la resistencia del hormigón) y el modo de rotura.

TIPO BARRA	TIEMPO (Días)	TEMPERATURA (°C)	PROBETA	AMASADA	$f_{p\text{areny}}$	$f_c \text{ max}$ (MPa)	$T_{\text{max}}$ (MPa)	$T_{\text{max}} / \sqrt{f_c}$ (MPa)	TIPO ROTURA
FCA14	28 días	20°C	A	2	19,82	32,83	10,5903	1,8483	RA
			B	2	17,73	32,83	10,6450	1,8578	RA
			C	2	18,58	32,83	8,2090	1,4327	RA
		50°C	A	2	18,35	30,53	9,2277	1,6701	RA
			B	2	18,84	30,53	8,1028	1,4665	RA
			C	2	18,95	30,53	9,4719	1,7142	RA
		80°C	A	2	19,34	28,56	8,0096	1,4987	RA
			B	2	18,82	28,56	8,7306	1,6336	RA
			C	2	19,36	28,56	11,5499	2,1611	RA
	60 días	20°C	A	5	17,50	33,58	7,2377	1,2490	RA
			B	5	20,00	33,58	5,5589	0,9593	RA
			C	5	18,50	33,58	4,6151	0,7964	RA
		50°C	A	5	17,00	31,68	7,5223	1,3365	RA
			B	5	19,00	31,68	8,0462	1,4295	RA
			C	5	18,50	31,68	9,1536	1,6263	RA
		80°C	A	5	18,00	29,23	9,3990	1,7385	RA
			B	5	18,00	29,23	8,7549	1,6193	RA
			C	5	18,00	29,23	8,4588	1,5646	RA
	180 días	20°C	A	8	21,00	51,66	14,3500	1,9965	RA
			B	8	19,50	51,66	12,4495	1,7321	RA
			C	8	19,00	51,66	12,1264	1,6872	RA
		50°C	A	8	19,00	39,56	20,6181	3,2781	RA
			B	8	19,50	39,56	19,6426	3,1230	RA
			C	8	19,00	39,56	17,5877	2,7963	RA
		80°C	A	8	19,20	34,91	20,2013	3,4190	RC
			B	8	20,50	34,91	18,9765	3,2117	RA
			C	8	20,10	34,91	18,5076	3,1324	RC

Tabla 3.9.- Datos ensayos de pullout de barras de CFRP Arenadas.

En la Tabla 3.10 se presentan los resultados de ensayo de las barra de CFRP arenadas en todas las edades y temperaturas ensayadas, reflejando la tensión con deslizamientos de 0,01 mm, 0,1 mm y a 1 mm, los desplazamientos en extremo no tensionado ( $\delta_{ENT}$ ), extremo tensionado ( $\delta_T$ ), tensión máxima y tensión media.

TIPO BARRA	TIEMPO (DÍAS)	TEMPERATURA (°C)	PROBETA	AMASADA	$T_{0.01}$ 0,01 mm (MPa)	$T_{0.1}$ 0,1 mm (MPa)	$T_{1}$ 1 mm (MPa)	$T_{max}$ (MPa)	$\delta_{ENT}$ (mm)	$\delta_T$ (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_{med}$ Normal. (MPa)	TIPO ROTURA
FCA14	28 días	20°C	A	2	4,1745	8,9725	10,5903	7,9124	0,4989	0,8040	9,81	1,71	RA
			B	2	2,2953	3,5733	10,4450	5,5045	1,3019	1,4847			RA
			C	2	1,4290	2,2624	8,2090	3,9668	1,7540	2,5145			RA
		50°C	A	2	0,0466	8,9784	9,2277	6,0842	0,1721	0,5862	8,93	1,62	RA
			B	2	3,7625	7,9772	8,1028	6,6142	0,1861	13,4350			RA
			C	2	6,6023	8,9157	9,4719	8,3300	0,2466	0,3696			RA
		80°C	A	2	4,3917	7,5874	8,0096	6,6629	0,2501	0,7183	9,43	1,76	RA
			B	2	3,4897	7,2035	8,7306	6,4746	0,4535	0,9026			RA
			C	2	7,5433	10,6457	11,5499	9,9130	0,3498	0,8087			RA
	60 días	20°C	A	5	0,6290	4,6805	7,2377	4,1824	0,2688	0,7119	5,80	1,68	RA
			B	5	3,3330	5,2580	5,5589	4,7166	0,3155	0,5790			RA
			C	5	1,6804	4,4499	4,6151	3,5818	0,0650	0,1966			RA
		50°C	A	5	2,7257	6,4364	7,5223	5,5615	0,3945	0,7723	8,24	1,46	RA
			B	5	4,0269	7,8863	8,0462	6,6531	0,1716	0,5291			RA
			C	5	3,1110	7,0290	9,1536	6,4312	0,4186	0,7338			RA
		80°C	A	5	1,0883	1,8188	9,3990	4,1020	1,0300	1,2221	8,87	1,64	RA
			B	5	2,0974	6,0554	8,7549	5,6359	0,4491	0,6597			RA
			C	5	1,8615	5,7485	7,2135	4,9412	0,3430	1,4961			RA
	180 días	20°C	A	8	10,5444	14,3004	14,3500	13,0649	0,0633	0,5194	12,98	1,81	RA
			B	8	12,4235	12,4495	12,4495	12,4408	0,0141	0,6514			RA
			C	8	8,7783	12,0890	12,6400	11,1691	0,1173	0,6234			RA
		50°C	A	8	6,0481	17,8290	20,6181	14,8317	0,3853	1,4691	19,28	3,07	RA
			B	8	11,0384	18,9718	19,6426	16,5509	0,2616	0,9643			RA
			C	8	7,9556	17,2268	17,5877	14,2567	0,1933	0,6652			RA
		80°C	A	8	15,3466	19,9169	20,2013	18,4883	0,1847	0,6042	19,23	3,25	RC
			B	8	6,3368	17,2248	18,9765	14,1794	0,2305	0,8691			RA
			C	8	8,7539	16,8163	18,5076	14,6926	0,3755	1,5928			RC

Tabla 3.10.- Datos de ensayo de pullout de barras de CFRP arenadas, tensión con deslizamientos de 0,01 mm, 0,1 mm y a 1 mm, los desplazamientos en extremo no tensionado ( $\delta_{ENT}$ ), extremo tensionado ( $\delta_T$ ), tensión máxima y tensión media normalizada.

### 3.5.3 Ensayos de Pullout con Barras de CFRP corrugadas

Se presentan en la Tabla 3.11 los datos de cada probeta, su tipo, periodo en el que ha permanecido en la cámara y temperatura a la que ha estado sometida. Se aportan la resistencia a compresión del hormigón, la tensión máxima, la tensión normalizada (que resulta de dividir la tensión máxima por la raíz cuadrada de la resistencia del hormigón) y el modo de rotura.

TIPO BARRA	TIEMPO (Días)	TEMPERATURA (°C)	PROBETA	AMASADA	$l_{pl0\text{ ray}}$	$f_{c, \text{max}}$ (MPa)	$T_{\text{max}}$ (MPa)	$T_{\text{max}} / \sqrt{f_c}$ (MPa)	TIPO ROTURA
FCC12	28 días	20°C	A	3	18,74	33,43	14,3952	2,4897	RA
			B	3	17,98	33,43	20,3269	3,5156	RC
			C	3	18,50	33,43	19,9572	3,4517	RC
		50°C	A	3	17,58	31,43	12,8345	2,2893	RA
			B	3	18,33	31,43	15,9394	2,8432	RA
			C	3	16,65	31,43	13,1857	2,3520	RA
		80°C	A	3	17,45	29,38	13,7806	2,5424	RA
			B	3	18,18	29,38	11,1497	2,0570	RA
			C	3	17,30	29,38	16,0112	2,9539	RA
	60 días	20°C	A	6	21,00	38,90	6,5807	1,0551	RC
			B	6	20,00	38,90	19,6156	3,1450	RA
			C	6	19,50	38,90	19,5271	3,1309	RA
		50°C	A	6	20,00	32,26	16,3815	2,8842	RA
			B	6	18,00	32,26	18,0511	3,1781	RA
			C	6	19,00	32,26	16,0686	2,8291	RA
		80°C	A	6	19,00	29,78	16,1725	2,9636	RA
			B	6	19,00	29,78	13,0635	2,3939	RA
			C	6	20,00	29,78	17,6576	3,2357	RA
	180 días	20°C	A	9	19,50	45,88	16,0442	2,3687	RA
			B	9	19,50	45,88	19,3312	2,8540	RA
			C	9	19,20	45,88	23,0667	3,4054	RA
		50°C	A	9	19,50	35,11	13,6843	2,3094	RA
			B	9	19,50	35,11	21,9242	3,7001	RA
			C	9	20,00	35,11	19,0462	3,2143	RA
		80°C	A	9	20,20	34,47	16,3209	2,7799	RA
			B	9	19,20	34,47	18,2342	3,1057	RA
			C	9	19,20	34,47	13,9701	2,3795	RA

Tabla 3.11.- Datos ensayos de pullout de barras de CFRP corrugadas.



En la Tabla 3.12 se presentan los resultados de ensayo de las barra de CFRP corrugadas en todas las edades y temperaturas ensayadas, reflejando la tensión con deslizamientos de 0,01 mm, 0,1 mm y a 1 mm, los desplazamientos en extremo no tensionado ( $\delta_{ENT}$ ), extremo tensionado ( $\delta_T$ ), tensión máxima y tensión media normalizada.

TIPO BARRA	TIEMPO (DÍAS)	TEMPERATURA (°C)	PROBETA	AMASADA	$T_{res}$ 0,01 mm (MPa)	$T_{res}$ 0,1 mm (MPa)	$T_{res}$ 1 mm (MPa)	$T_{res}$ (MPa)	$\delta_{ENT}$ (mm)	$\delta_T$ (mm)	$\sigma_{máx.}$ (MPa)	$\sigma_{med}$ Normal. (MPa)	TIPO ROTURA
FCC 12	28 días	20°C	A	3	1,4404	3,0729	14,3952	6,3028	1,2150	1,8490	18,23	3,15	RA
			B	3	4,5101	8,1235	20,3269	10,9868	1,4883	3,0574			RC
			C	3	1,9547	6,4558	19,9572	9,4559	1,2010	1,7393			RC
		50°C	A	3	2,0349	4,5910	12,8345	6,4868	1,2798	1,6842	13,99	2,49	RA
			B	3	2,7434	8,3281	15,9394	9,0036	1,3915	2,1688			RA
			C	3	2,5742	5,8673	13,1857	7,2091	1,3460	1,8173			RA
		80°C	A	3	0,1149	4,2889	13,7806	6,0615	1,2777	2,1392	13,65	2,52	RA
			B	3	0,7213	5,7910	11,1497	5,8873	1,2690	1,8926			RA
			C	3	1,9243	8,5794	16,0112	8,8383	1,0368	2,4716			RA
	60 días	20°C	A	6	0,7922	3,5183	6,5807	3,6304	0,2189	0,4414	19,57	3,14	RC
			B	6	0,9928	5,7584	19,6156	8,7889	1,1983	2,1547			RA
			C	6	1,1714	4,7623	19,5271	8,4869	1,4580	2,8321			RA
		50°C	A	6	0,7169	4,0559	16,3815	7,0514	1,0186	1,7908	16,83	2,96	RA
			B	6	1,2051	7,1446	18,0511	8,8003	0,9562	1,5560			RA
			C	6	1,5387	5,5548	16,0686	7,7207	0,9515	2,5700			RA
		80°C	A	6	0,1655	6,9444	16,1725	7,7608	0,7684	1,9023	15,63	2,86	RA
			B	6	1,0388	5,5925	13,0635	6,5649	1,1298	1,9336			RA
			C	6	1,6307	8,7157	17,6576	9,3347	0,9736	1,8376			RA
	180 días	20°C	A	9	2,4031	8,4199	16,0442	8,9557	0,7891	1,5918	21,20	2,88	RA
			B	9	5,5960	12,4655	19,3312	12,4642	0,7577	1,3039			RA
			C	9	2,2322	9,2254	23,0670	11,5082	0,9679	1,8068			RA
		50°C	A	9	1,1964	4,5904	13,6843	6,4904	2,1051	3,2999	18,22	3,07	RA
			B	9	1,0492	8,0854	21,9242	10,3529	0,9713	1,9297			RA
			C	9	1,0038	6,8376	19,0462	8,9625	0,8849	1,8586			RA
		80°C	A	9	0,4522	4,4716	16,3209	7,0816	0,8606	1,5053	16,18	2,76	RA
			B	9	1,4953	8,4944	18,2342	9,4080	0,7355	0,9146			RA
			C	9	1,2185	4,7282	13,9701	6,6389	1,0170	1,4719			RA

Tabla 3.12.- Datos de ensayo de pullout de barras de CFRP corrugadas, tensión con deslizamientos de 0,01 mm, 0,1 mm y a 1 mm, los desplazamientos en extremo no tensionado ( $\delta_{ENT}$ ), extremo tensionado ( $\delta_T$ ), tensión máxima y tensión media normalizada.

A continuación se presentan una gráficas que relacionan la Tensión Normalizada y la Tensión Máxima con los días de duración ensayo, estudiando la evolución por cada temperatura.

3.5.4 Gráficas resultados de ensayos pullout.

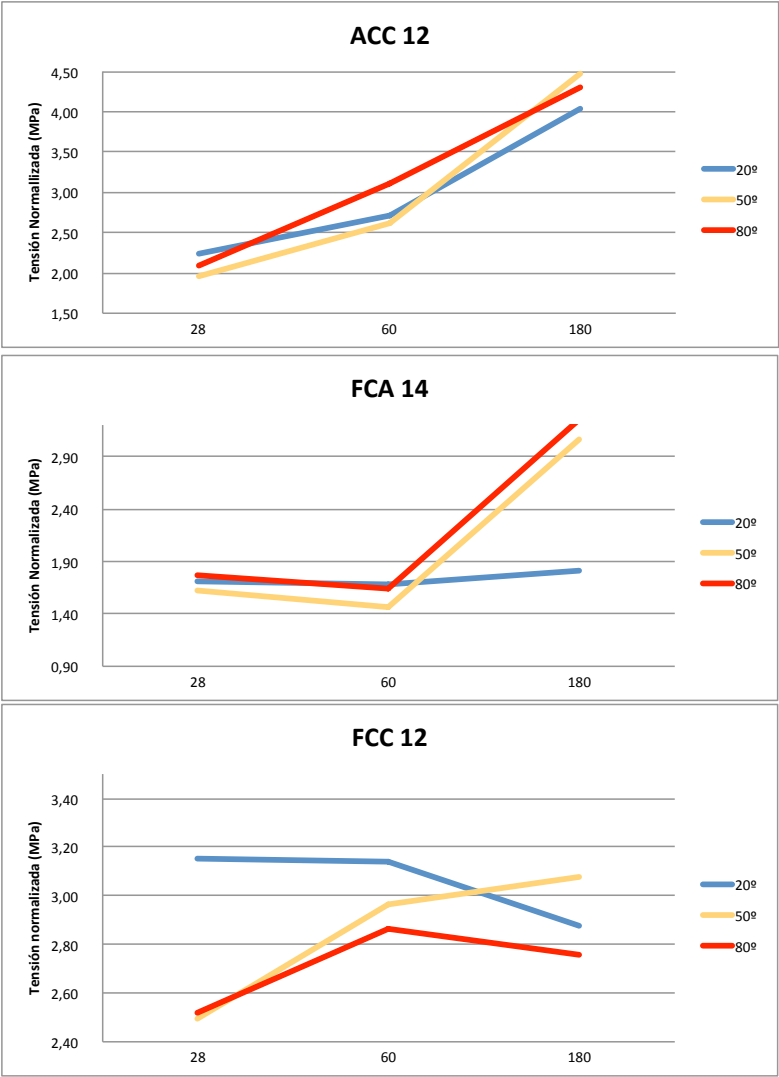


Tabla 3.13.- Evolución de las tensiones normalizadas alcanzadas durante el ensayo para distintas temperatura de conservación de las probetas, en función de los días de duración de las condiciones climáticas.



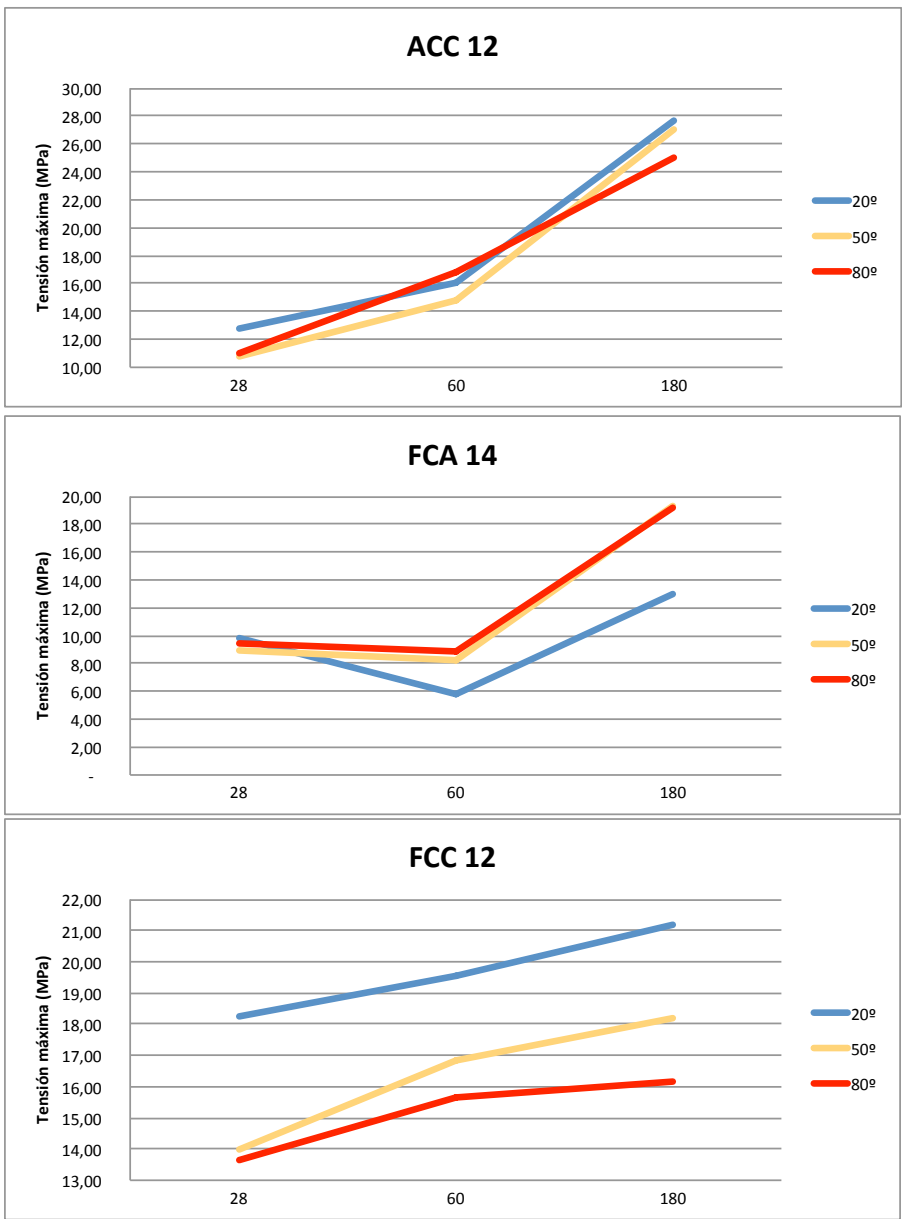


Tabla 3.14.- Evolución de las tensiones máximas alcanzadas durante el ensayo para distintas temperatura de conservación de las probetas, en función de los días de duración de las condiciones climáticas.

Si se estudia la evolución de las Tensiones Normalizada y Máxima para una misma duración de condiciones climáticas, se tiene:

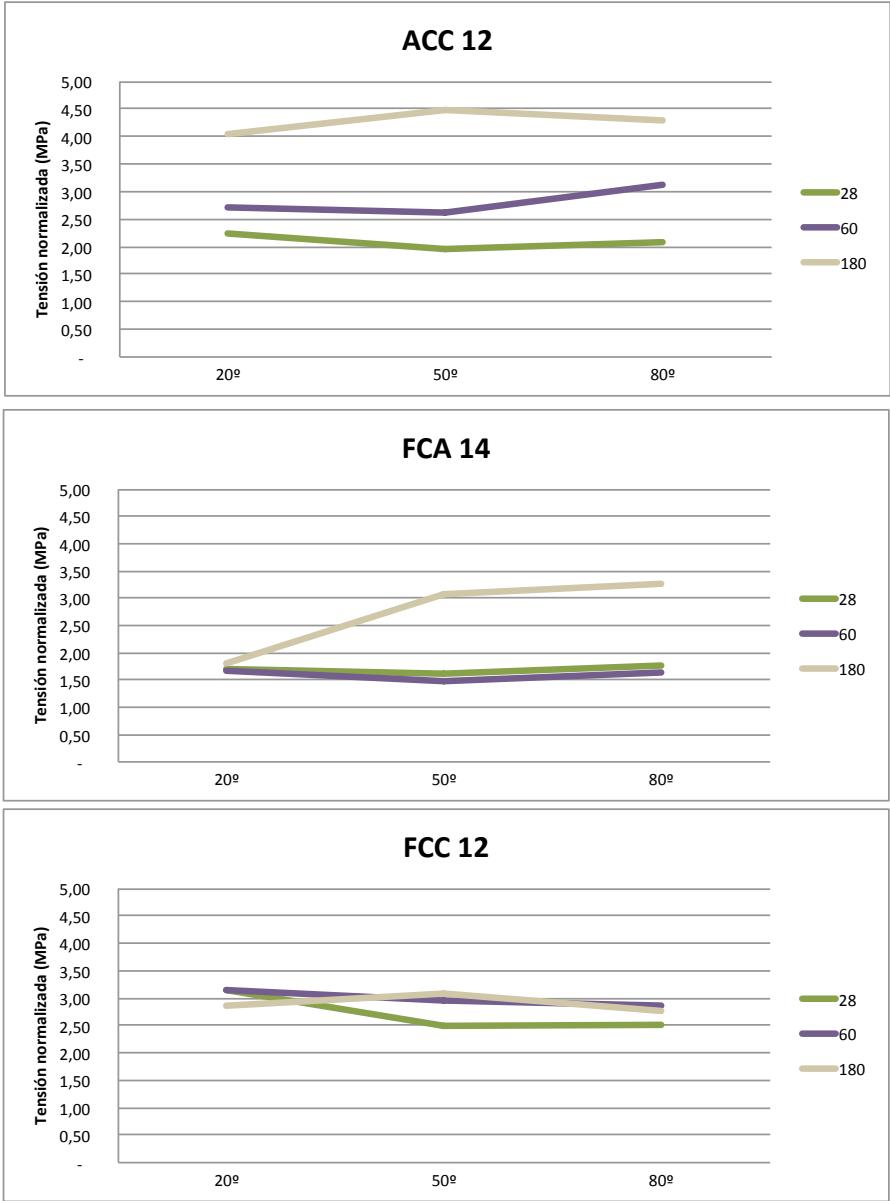


Tabla 3.15.- Evolución de tensiones normalizadas alcanzadas en función del periodo mantenido en cada una de las temperaturas.

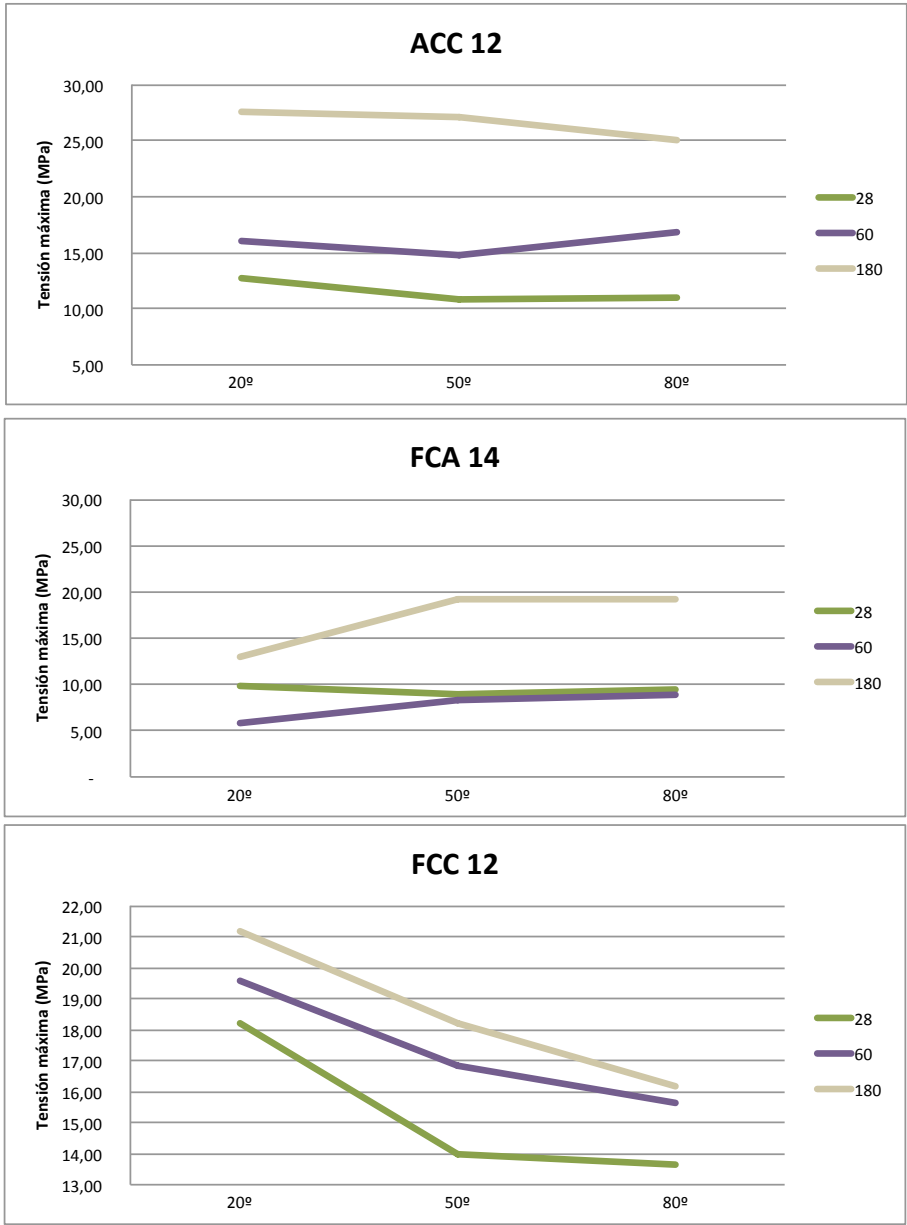


Tabla 3.16.- Evolución de tensiones máximas alcanzadas en función del periodo mantenido en cada una de las temperaturas.

Se estudia a continuación la relación entre desplazamientos en extremo tensionado y extremo no tensionado con la tensión adherente de las barras de CFRP Corrugado, por edades de ensayos.

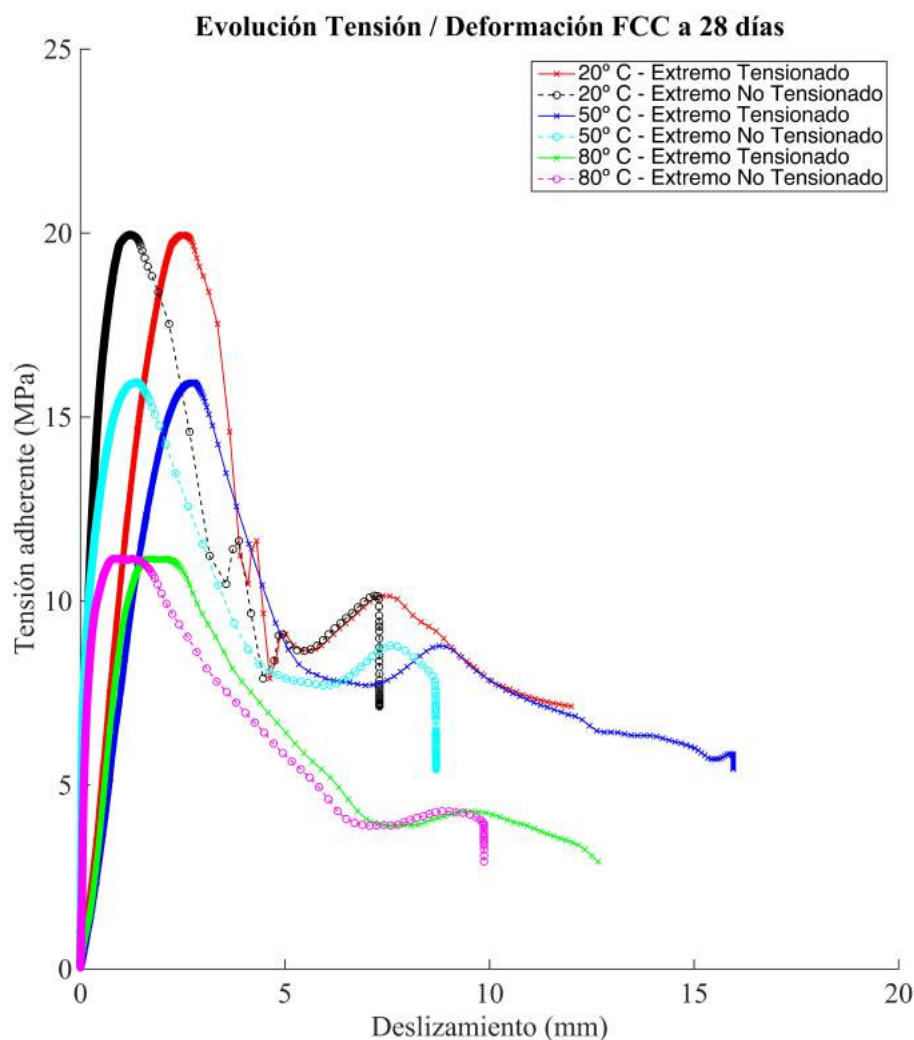


Fig. 3.19.- Evolución Tensión / Deformación de las probetas con barras de CFRP corrugadas a 28 días según temperatura de 20°, 50° y 80° C.

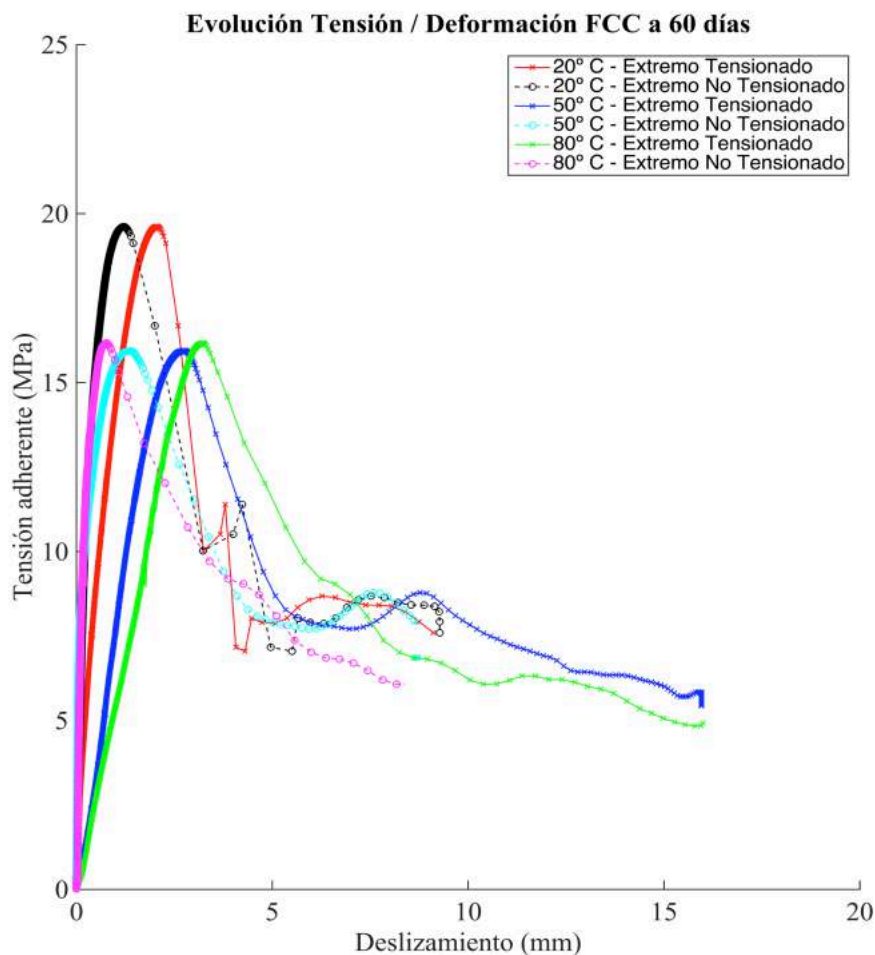


Fig. 3.20.- Evolución tensión / deformación de las probetas con barras de CFRP corrugadas a 60 días según temperatura de 20°, 50° y 80° C.

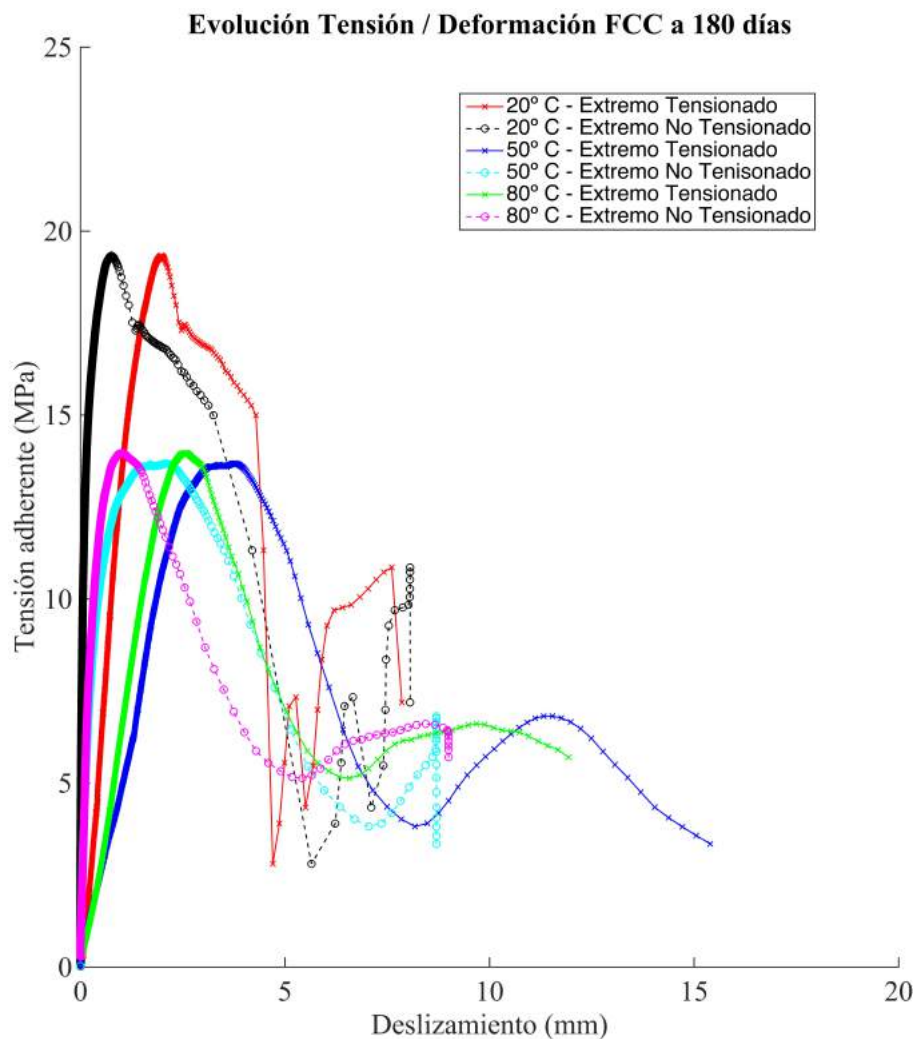


Fig. 3.21.- Evolución tensión / deformación de las probetas con barras de CFRP corrugadas a 180 días según temperatura de 20°, 50° y 80° C.

A continuación se presentan gráficas con la relación entre deslizamientos en extremo tensionado y extremo no tensionado con la tensión adherente de las barras de CFRP arenadas, por edades de ensayos.

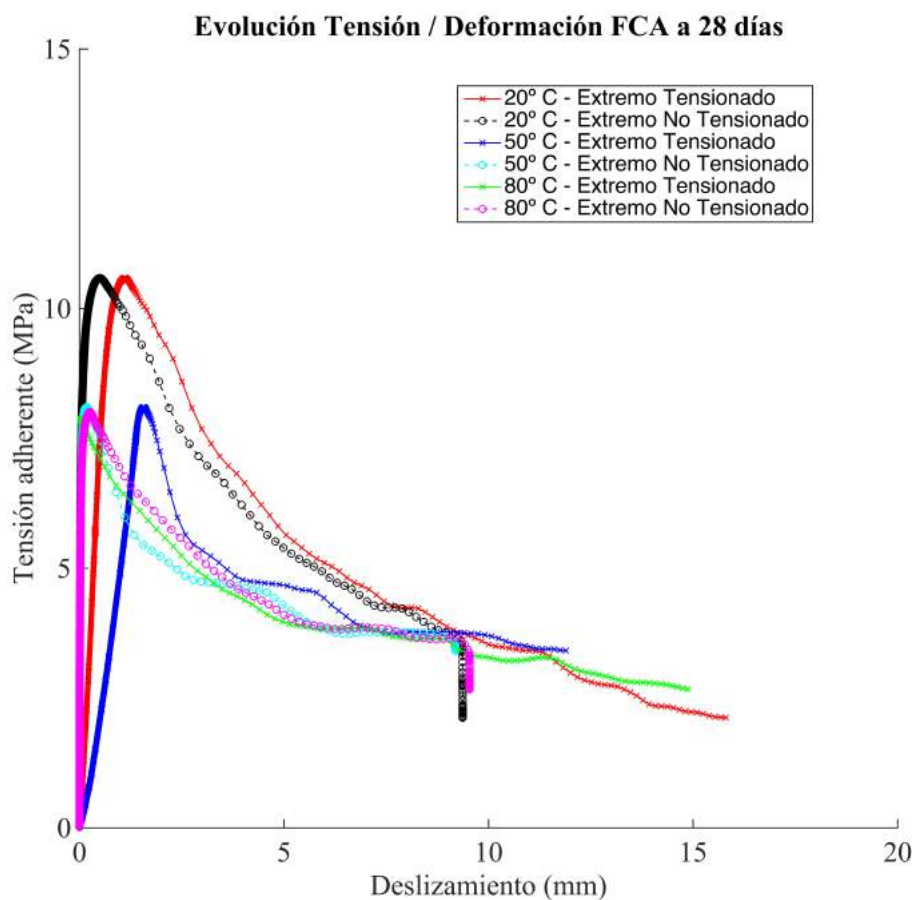


Fig. 3.22.- Evolución tensión / deformación de las probetas con barras de CFRP arenadas a 28 días según temperatura de 20°, 50° y 80° C.

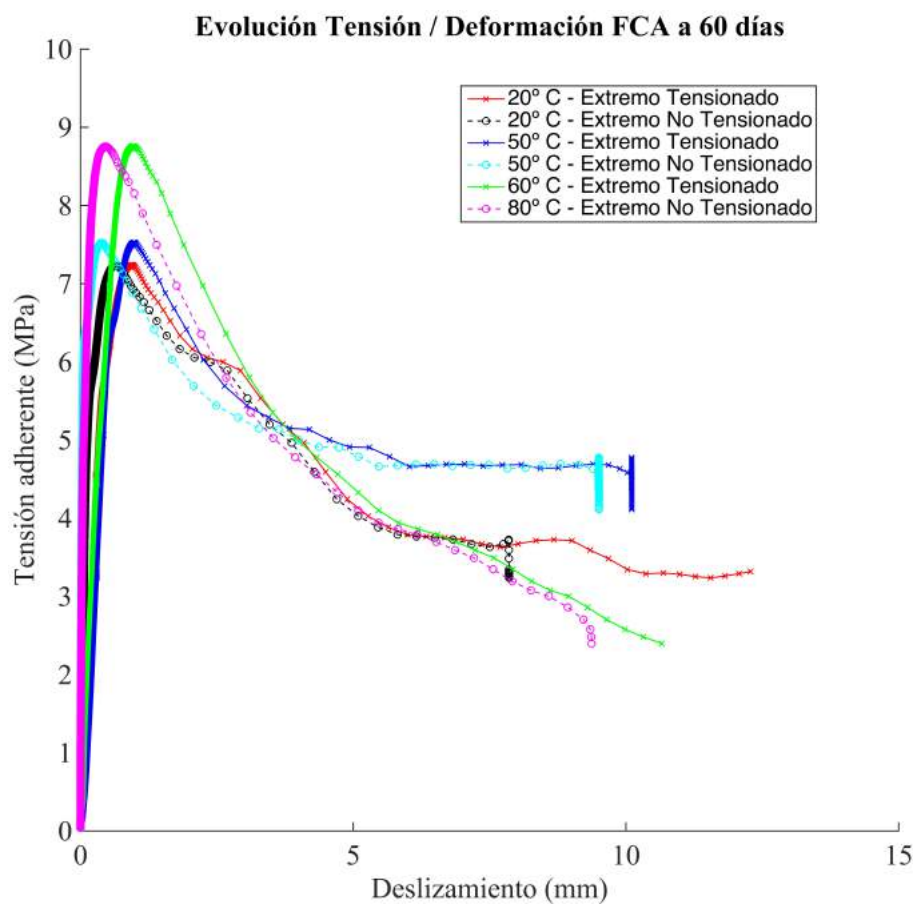


Fig. 3.23.- Evolución tensión / deformación de las probetas con barras de CFRP arenadas a 60 días según temperatura de 20°, 50° y 80° C.



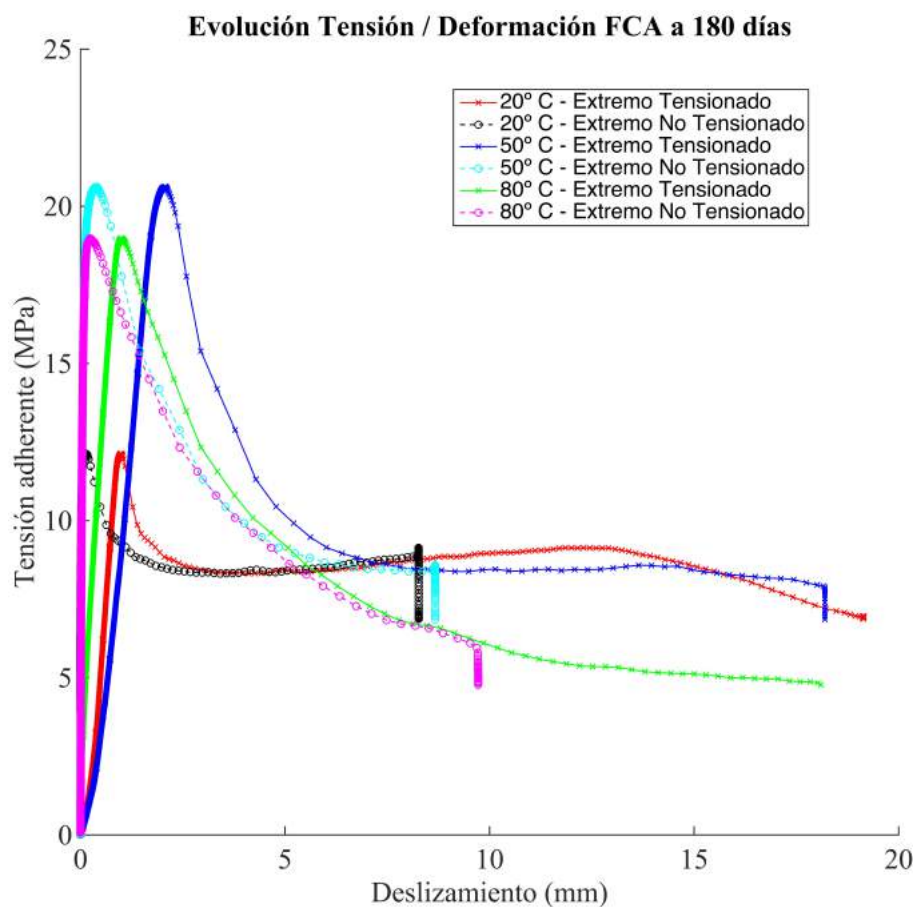


Fig. 3.24.- Evolución tensión / deformación de las probetas con barras de CFRP arenadas a 180 días según temperatura de 20°, 50° y 80° C.

A continuación se presentan gráficas con la relación entre desplazamientos en extremo tensionado y extremo no tensionado con la tensión adherente de las barras de acero, por edades de ensayos.

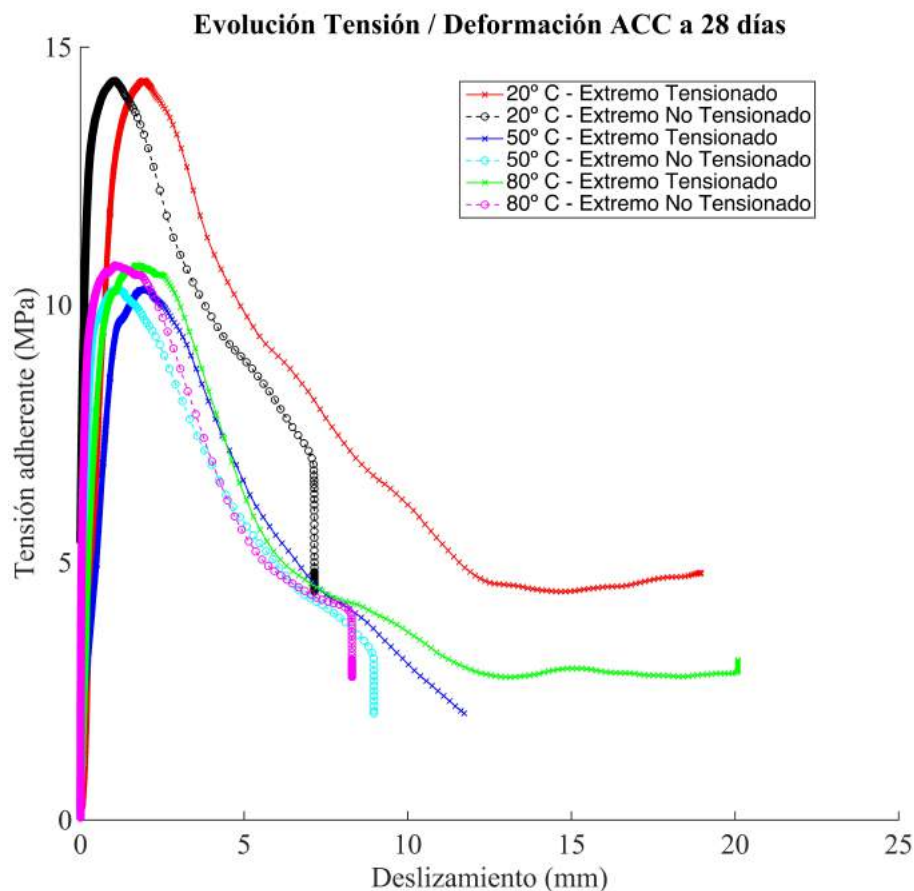


Fig. 3.25.- Evolución tensión / deformación de las probetas con barras de acero a 28 días según temperatura de 20°, 50° y 80° C.

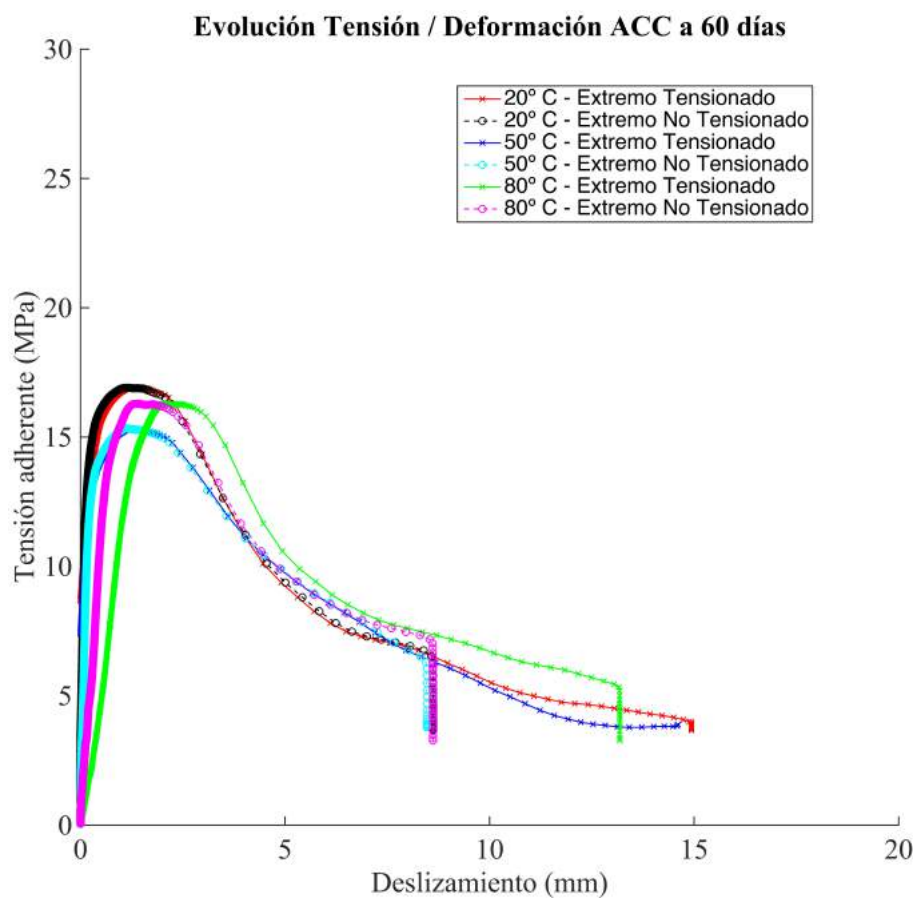


Fig. 3.26.- Evolución tensión / deformación de las probetas con barras de acero a 60 días según temperatura a 20°, 50° y 80° C.

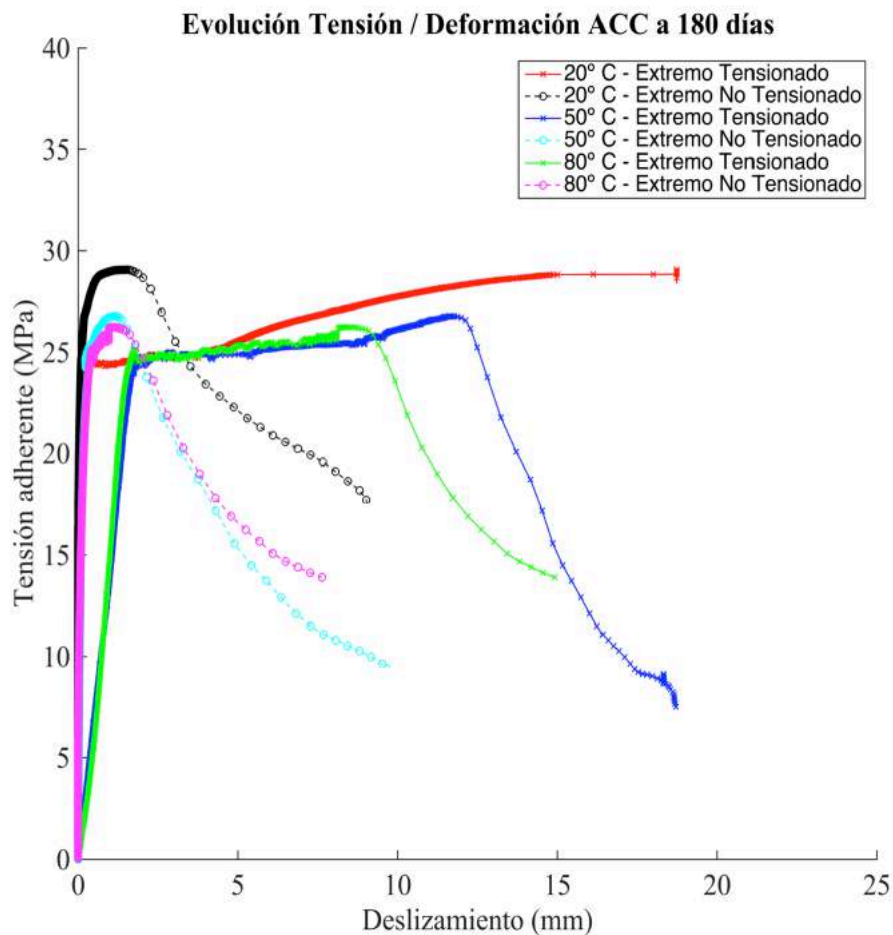


Fig. 3.27.- Evolución Tensión / Deformación de las probetas con barras de acero a 180 días según temperatura a 20°, 50° y 80° C.

Una vez completado cada ensayo de pullout se precedió a partir la probeta en la prensa de compresión para poder fotografiar las superficies de adherencia del hormigón con las barras, extraer estas para analizar su superficie adherente (Fig. 3.26) y determinar la forma de rotura, según se ha reflejado en las tablas 3.8, 3.9 y 3.11.

Para documentar adecuadamente la forma de rotura y poder analizar cómo se comportó cada material constituyente de las diferentes barras, se tomaron imágenes de la superficie adherente con el microscopio digital PCE-MM200.

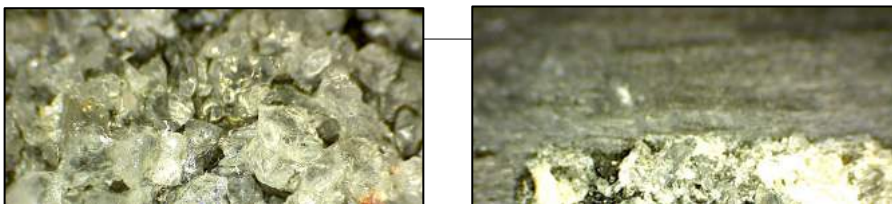
En el Anexo I se incluye una ficha de cada una de las barras ensayadas con las gráficas tensión/deformación, en las que se incluye una imagen que ayuda a interpretar su modo de rotura.



Fig. 3.28.- Probetas ya sometidas a ensayo de pullout y posteriormente partidas de modo que quede vista la zona adherente hormigón / Barra, permitiendo la extracción de la barra para seguir con ensayos complementarios.

### 3.5.5 Imágenes para la caracterización de la forma de rotura de las barras

Como se ha anticipado en la página anterior, se tomaron imágenes de cada una de las barras a las diferentes temperaturas del estudio.



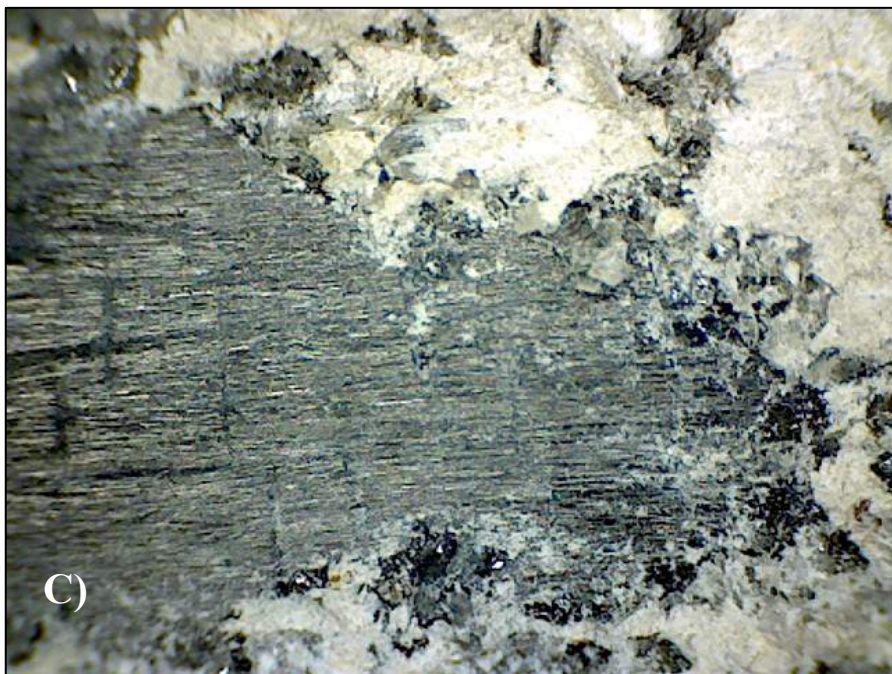


Fig. 3.29.- Barra de CFRP arenada ensayada a 208 días y a 20° C. A) Granulado de capa revestimientos adherente, B) Restos de recubrimiento sobre fibra sin recubrimiento y C) Interfaz recubrimiento con zona en que el mismo se ha adherido al hormigón y desprendido de la barra.

La Fig. 3.29 es un grupo de imágenes que ilustran el comportamiento de las barras de CFRP arenadas ante el ensayo de pullout, en que el recubrimiento granular pierde, en un momento dado, la adherencia con el núcleo de la barra, produciéndose de manera sensiblemente frágil la pérdida de resistencia por adherencia a la probeta de hormigón.



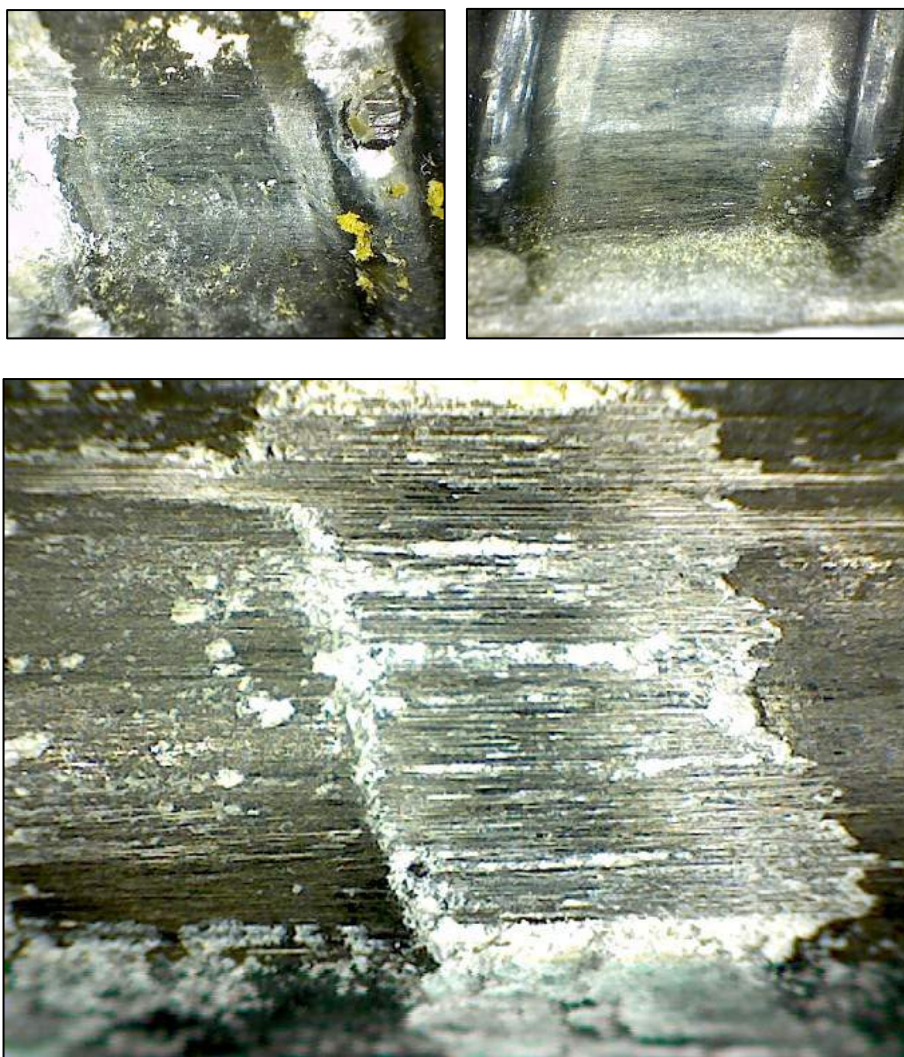


Fig. 3.30.- Barra de CFRP Corrugada ensayada a 28 días y a 20° C. A) restos de una corruga, junto a otra cortada del núcleo de la barra, B) Corrugas y aleta de la barra sin ensayar y C) Corrua totalmente desaparecida de la barra en longitud adherente.

Se observa como las corrugas de las barras CFRP, a diferencia de las de acero, fueron arrancadas del núcleo de la barras al producirse la rotura por adherencia entre hormigón y barra. En la Fig. 3.30 se observa el arrancamiento de las corrugas.

En la Fig. 3.31 se aprecia cómo las corrugas de las barras de acero sí soportan perfectamente el ensayo de pullout, mostrando el

hormigón retenido entre corrugas, una vez cortado este al superarse la tensión máxima adherente (Fig. 3.31.B)

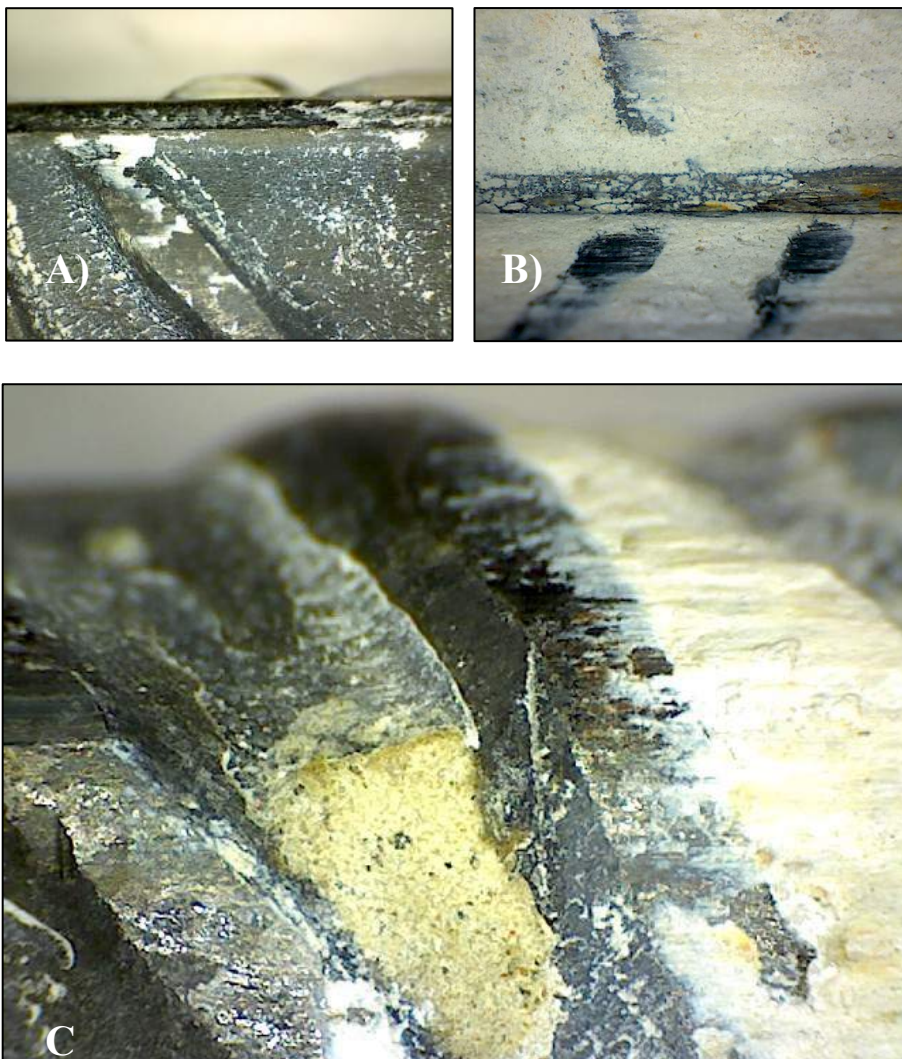


Fig. 3.31 Barra de Acero ensayada a 28 días y a 20° C. A) Zona entre corrugas sin restos de hormigón adherido, B) Zona entre corrugas totalmente colmatada de hormigón y C) Zona de corrugas con y sin hormigón adherido.

Se completa esta caracterización del modo de rotura con imágenes tomadas de la superficie de las barras y el hormigón de las probetas, con cámara Sony Reflex mod A33.



En ellas, se observa cómo se ha desarrollado la tensión adherente en la superficie hormigón / acero, pudiendo observar los diferentes modos en que se produce la rotura.



Fig. 3.32.- Probeta pullout con barra CFRP arenada, ensayada a 180 días y 80° C. A) Recubrimiento granular adherido al hormigón y desprendido del núcleo de la barra, B) Zona de la longitud adherente sin recubrimiento, que quedó adherido al hormigón y C) Barra en el hormigón de la probeta, con zonas sin recubrimiento granular.

Se observa como en las barras de CFRP arenadas la rotura adherente se produce por la separación del revestimiento granular que forma la geometría superficial y el núcleo de la barra (Fig. 3.32), que



en mayor o menor grado, deja descubierto ese núcleo de fibra quedando adherida la capa granular en el hormigón de la probeta.

Fig. 3.33.- Probeta pullout con barra CFRP corrugada, ensayada a 28 días y 20° C. A) Longitud adherente de la barra en el hormigón de la probeta, B) Se aprecia la total desaparición de la corrugas en la longitud adherente y C) Corrugas incrustadas en el hormigón de la probeta tras el ensayo.

En la Fig. 3.33 se observa la rotura adherente de las barras de CFRP corrugadas, con las corrugas seccionadas.

Se aprecia como han quedado ancladas en el hormigón.

Con barras de acero, se comprueba una rotura tipo pullout (PO), donde el hormigón colmata el espacio entre corrugas, anclando la

barra a al probeta hasta el final del ensayo, sin alteraciones en al barra de acero que intervengan en la pérdida de adherencia final (Fig. 3.34).



Fig. 3.34.- Probeta pullout con barra de acero, ensayada a 28 días y 20° C. A) y B) Hormigón incrustado entre las corrugas de la barra y C) Arrancamiento completo del hormigón introducido entre las corrugas de la barra.

### 3.6 Ensayos Complementarios

Una vez obtenidos los datos de tensión y deslizamiento mediante ensayos de pullout, se completa con otros ensayos que aporten más información para determinar la influencia de la temperatura en la adherencia de las barras de CRFP con el hormigón.

Se ha realizado cuatro tipos de ensayos complementarios:

- Resistencia a compresión del Hormigón
- Microscopía Óptica
- Microscopía Electrónica de Barrido SEM
- Microscopía de Fuerza Atómica “AFM”

Con los datos obtenidos en estos ensayos, se está en disposición de analizar y discutir los resultados y establecer conclusiones de comportamientos de las diferentes barras.

#### 3.6.1 Ensayo de resistencia a compresión del hormigón

Dadas las diferentes edades de los ensayos de pullout, que van desde los 28 días hasta los 180, es previsible un importante incremento de la resistencia a compresión en este período, siendo determinante conocer la evolución, pues habrá pasado seis veces más tiempo desde los primeros ensayos a los últimos.

Como se avanzó en el apartado anterior, se prepararon 9 probetas cúbicas de 100x100x100 mm por cada amasada. El modo de fabricación fue mediante molde único de 300x100x100 mm y posterior corte con sierra de agua (Fig. 3.34), previo al ensayo de rotura a compresión.

El proceso de fabricación es simultáneo al descrito para las probetas de pullout, utilizando la misma amasada, y etiquetándolas como sigue:

**TIPO BARRA / DÍAS / TEMPERATURAS - AMASADA**

*Tipo Barra: ACC, FCA y FCC*

*Días: 028, 060 y 180*

*Temperaturas: 20° C, 50° C y 80° C*

Además, en cada probeta se anota: **FECHA FABRICACIÓN, N° LAMASAD y FIRMA.**

A modo de ejemplo, se presenta en la Fig. 3.35 una probeta ya ensayada, cuya codificación es:

**ACC 180 / 20-50-80**

**Barra de CFRP Acero, a 180 días, a 20, 50 y 80 ° C**

Fabricada el 23/SEP/2015, Amasada 7, por FCL (*Fernando Cos-Gayón López*)

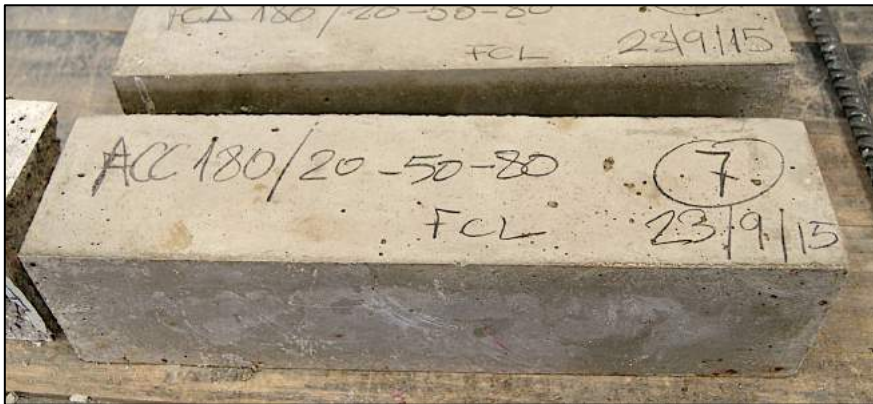


Fig. 3.35.- Probeta ACC 180/20-50-80 para ensayo de resistencia a compresión de cada amasada de hormigón en cada rango de temperatura, una vez cortadas en tres unidades.





Fig. 3.36.- Corte de probeta para ensayo a compresión del hormigón en tres unidades de 100x100x100 mm, para garantizar homogeneidad de la muestra.

Una vez cortadas las probetas, se procedió a su ensayo en la prensa de ensayo a compresión del hormigón, marca Ibertest MEI-1500-SW.

Los resultados se adjuntan en la tabla 3.17 de la página siguiente, donde aparecen todas las probetas ordenadas por edades, nº de amasada y temperatura.

Se ha calculado una tensión media por amasada y temperatura, cuyos resultados permiten evaluar la evolución del hormigón mediante gráficas que permitirán establecer la tendencia según las condiciones climáticas y la edad.

Además de estos ensayos para determinar la resistencia a compresión, se realizaron 6 testigos obtenidos directamente de las probetas previamente ensayadas a pullout, cuyos datos confirmaron esos resultados, y que se tomaron a 180 días, 2 a 50 °C y 2 a 80 °C, a modo de contraste.

EDAD	AMASADA	PROBETA / TEMPERATURA	$f_c$ max (MPa)			$f_c$ media (MPa)
			A	B	C	
28 días	1	20 °C	32,72	33,25	31,71	32,56
		50 °C	30,20	32,10	28,57	30,29
		80 °C	26,35	28,12	28,57	27,68
	2	20 °C	33,67	32,75	32,07	32,83
		50 °C	31,20	28,30	32,09	30,53
		80 °C	27,34	30,19	28,15	28,56
	3	20 °C	34,21	32,60	33,48	33,43
		50 °C	30,78	31,26	32,25	31,43
		80 °C	28,67	29,20	30,27	29,38
60 días	4	20 °C	36,56	37,45	30,63	34,88
		50 °C	32,06	31,25	32,54	31,95
		80 °C	28,93	31,23	27,95	29,37
	5	20 °C	32,67	34,70	33,37	33,58
		50 °C	32,10	29,50	33,44	31,68
		80 °C	28,37	29,04	30,28	29,23
	6	20 °C	39,23	37,89	39,58	38,90
		50 °C	33,24	31,29	32,25	32,26
		80 °C	31,07	29,31	28,96	29,78
180 días	7	20 °C	43,56	46,78	49,79	46,71
		50 °C	35,97	37,96	36,02	36,65
		80 °C	31,76	36,45	33,19	33,80
	8	20 °C	52,10	50,60	52,28	51,66
		50 °C	38,56	40,73	39,39	39,56
		80 °C	36,45	33,76	34,52	34,91
	9	20 °C	45,70	44,36	47,58	45,88
		50 °C	36,03	34,97	34,33	35,11
		80 °C	33,86	35,31	34,24	34,47

Tabla 3.17.- Resultados de los ensayos para determinar la resistencia a compresión del hormigón utilizado para confeccionar las probetas de pullout.

Con estos datos, se han obtenido unos valores medios de rotura a compresión por edades y temperaturas, recogidos en la Tabla 3.18, que se han utilizado para analizar las tendencias de evolución de dichas resistencias, representadas en las gráficas de la Fig. 3.37.

TIEMPO / ° T	20 °C	50 °C	80 °C
28 días	32,94	30,75	28,54
60 días	35,79	31,96	29,46
180 días	48,08	37,11	34,39

Tabla 3.18.- Valores medios de resistencia a compresión del hormigón ordenados por edades y temperaturas.

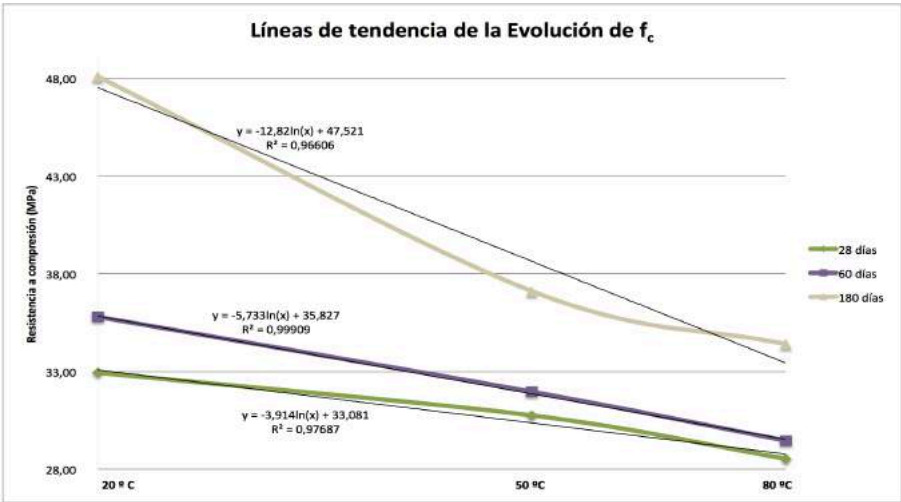


Fig. 3.37.- Gráfica de tendencia de evolución de resistencia a compresión del hormigón según edad y temperatura.

En la Fig. 3.37 se presenta la tendencia descendente en todas las edades al aumentar la temperatura, aportándose unas ecuaciones logarítmicas que aproximan la resistencia a compresión del hormigón en función de la temperatura.

A efectos de valorar porcentualmente la pérdida de resistencia a compresión, en la Fig. 3.38 se muestran los porcentajes respecto al 100% que se considera a la temperatura de 20 °C, ordenados por edades.



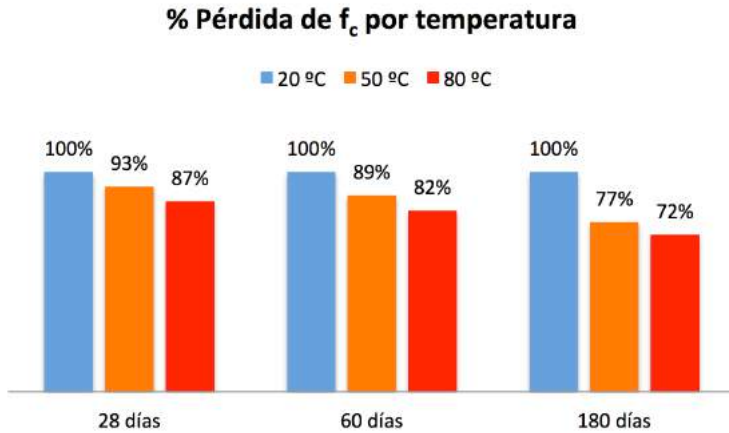


Fig. 3.38.- Gráfica de % de pérdida de resistencia a compresión debido a altas temperaturas, ordenado por edades del hormigón.

Como se observa, la influencia de altas temperaturas en el comportamiento a compresión del hormigón está directamente relacionada con la duración las condiciones climáticas de la muestra, reflejando una disminución de hasta un 28% cuando las muestras están sometidas a 80 °C durante 180 días.

Aun con ello, se aprecia que las resistencias a compresión obtenidas a 180 y 80 °C son superiores a las obtenidas a temperatura ambiente (20 °C) y 28 días (Tabla 3.18 de la página 143), lo que supone una variable a considerar en la interpretación de los ensayos a pullout con las diferentes barras utilizadas en esta investigación.

### 3.6.2 Ensayos de Microscopía Óptica

Se han analizado los dos probetas de cada uno de los dos tipos de barras de CFRP que conforman esta investigación, con cada temperatura y condiciones climáticas. Dichas probetas se han sometido a las mismas condiciones climáticas que las probetas ensayadas en pullout, sin haber sido sometidas a este último.

Así pues, se conservaron junto a las probetas pullout y se ensayaron de manera simultánea. La nomenclatura de las probetas ha sido la siguiente:

### ENSAYO/**TIPO BARRA**\_TEMPERATURA/DÍAS

**Tipo Ensayo: MO (Microscopio Óptico)**

#### **Tipo de Barra**

CC12: Barra CFRP corrugada

CA14: Barra CFRP arenada

#### **Condiciones de Temperatura**

20°, 50° y 80° C

#### **Días en condiciones climáticas**

28, 60 y 180 días

Ejemplo:

**MO/CC12\_20/180d**



Fig. 3.39.- Lote de probetas a ensayar con Microscopio Óptico.

Las probetas se han extraído de secciones ortogonales al eje de la barra, y su preparación y ensayo ha seguido el siguiente proceso:

- Se seleccionan aleatoriamente las muestras entre las barras de CFRP arenadas d14 y corrugadas d12
- Se preparan cortando en máquinas marca Remet TR100 Evolution y Struers Accutom 5.
- Se embute la probeta en polimetilmetacrilato en máquina Struers LaboPol-5 y 21. Terminando con lijas de finura 250-4000.
- Se introducen en las cámaras climáticas descritas en el apartado 3.5, a 50° C (Fig. 3.10) y a 80° C (Fig. 3.11).
- Caja térmica para transporte de muestras hasta punto de ensayo, que evita pérdida de temperatura.
- Microscopio óptico marca Nikon Eclipse LV 100 (Fig. 3.40)



Fig. 3.40.- Probeta en Microscopio Óptico.

Una vez preparadas las probetas metalográficamente y cumplido el ciclo en condiciones climáticas especificadas, se transportan al microscopio y se procede a su ensayo.

Las imágenes que proporciona este ensayo son secciones transversales de la barra, y se ha estudiado diferentes zonas, cuidando observar detenidamente los encuentros entre revestimiento de granulado y núcleo en las barras CFRP arenadas, y el encuentro corruga y aleta con núcleo de las barras CFRP corrugadas.

A continuación se muestran las imágenes más representativas por tipo de barra, temperatura y duración de condiciones climáticas que aportaron datos que completan los resultados obtenidos.

Se ha estructurado la presentación de estas imágenes por tipo de barra.

En primer lugar se muestran las correspondientes a las barras de CFRP arenadas d14, en las que se analizado el núcleo, la corruga y la interface, a 50, 100, 200, 1000 aumentos.

Con relación a las probetas de barras de CFRP corrugadas d12, también se ha seguido el criterio anterior, abundando en el detalle del interface corruga/núcleo, donde se aprecian los distintos materiales que componen cada parte de la barra.

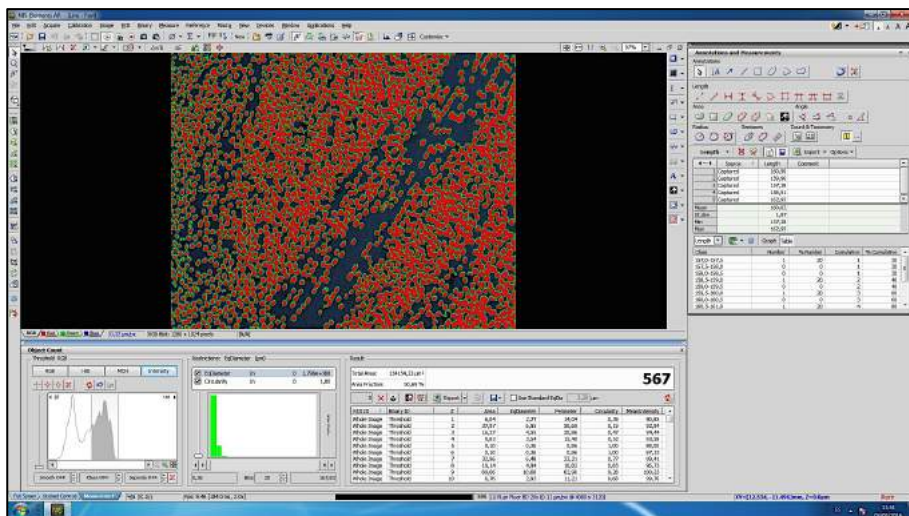


Fig. 3.41.- Captura de pantalla durante el proceso de toma de imágenes en el Microscopio Óptico.

### 3.6.2.1. Imágenes Microscopía Óptica de barras de CFRP arenadas d14

En la imágenes se observa la evolución percibida en las barras de CFRP arenadas al someterlas a diferentes temperaturas durante el primer ciclo, el de 28 días.

#### Condiciones de Temperatura durante 28 días y 20° C

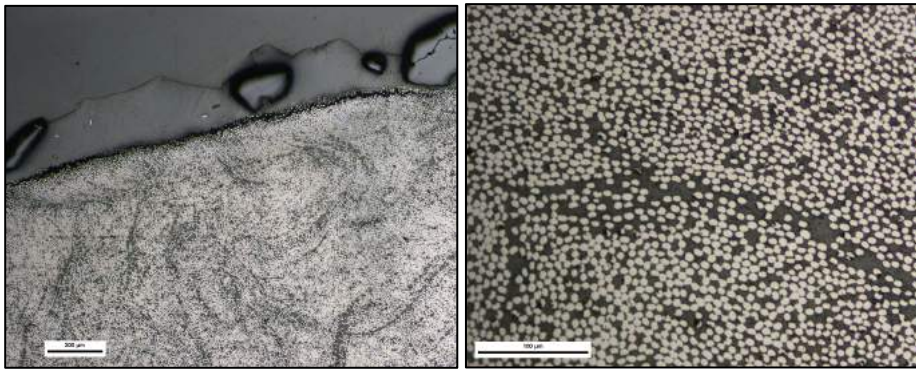


Fig. 3.42.- MO/CA\_20/28d. Izquierda, Interfaz núcleo geometría superficial. Derecha, núcleo de la barra.

#### Condiciones de Temperatura durante 28 días y 50° C

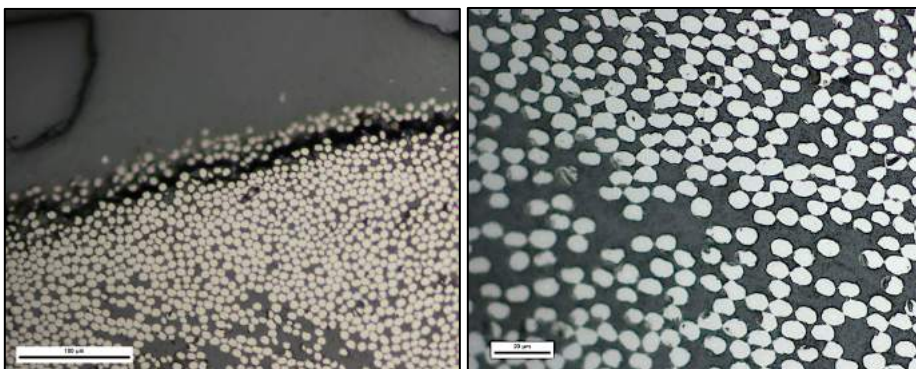


Fig. 3.43.- MO/CA\_50/28d. Izquierda, Interfaz núcleo geometría superficial. Derecha, núcleo de la barra.



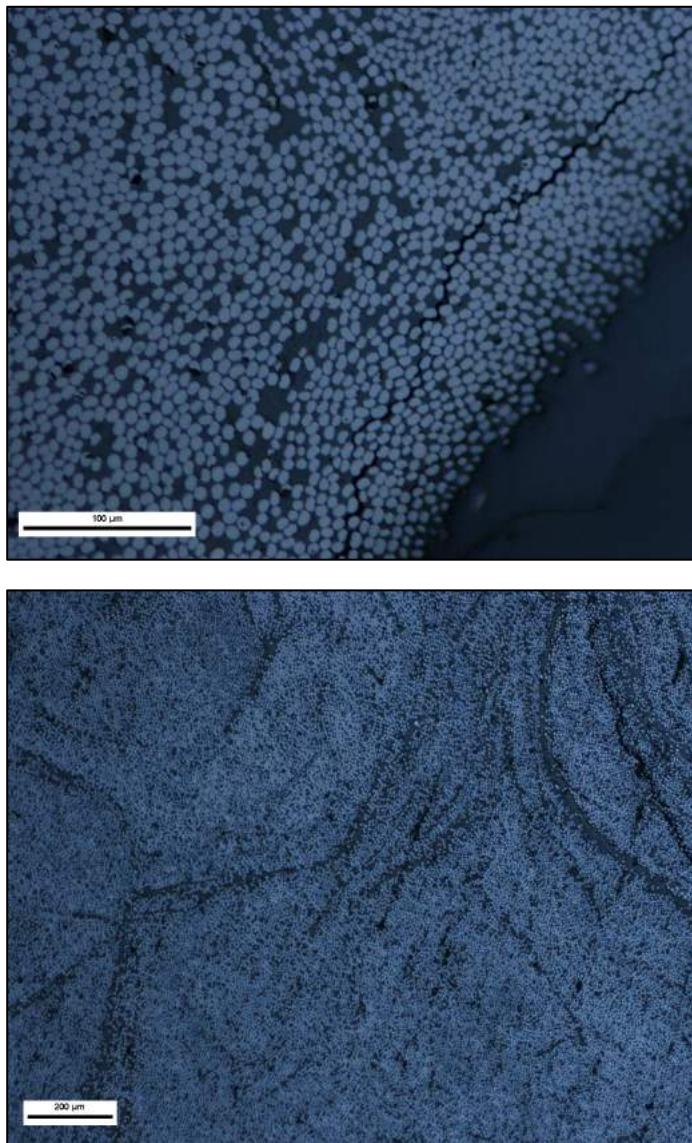
Condiciones de Temperatura durante 28 días y 80° C

Fig. 3.44.- MO/CA\_80/28d. Arriba, Interfaz núcleo geometría superficial. Abajo, núcleo de la barra.

Se puede observar como a 28 días y 80 °C en el núcleo la barra no se perciben daños relevantes.

---

Condiciones de Temperatura durante 60 días y 20° C

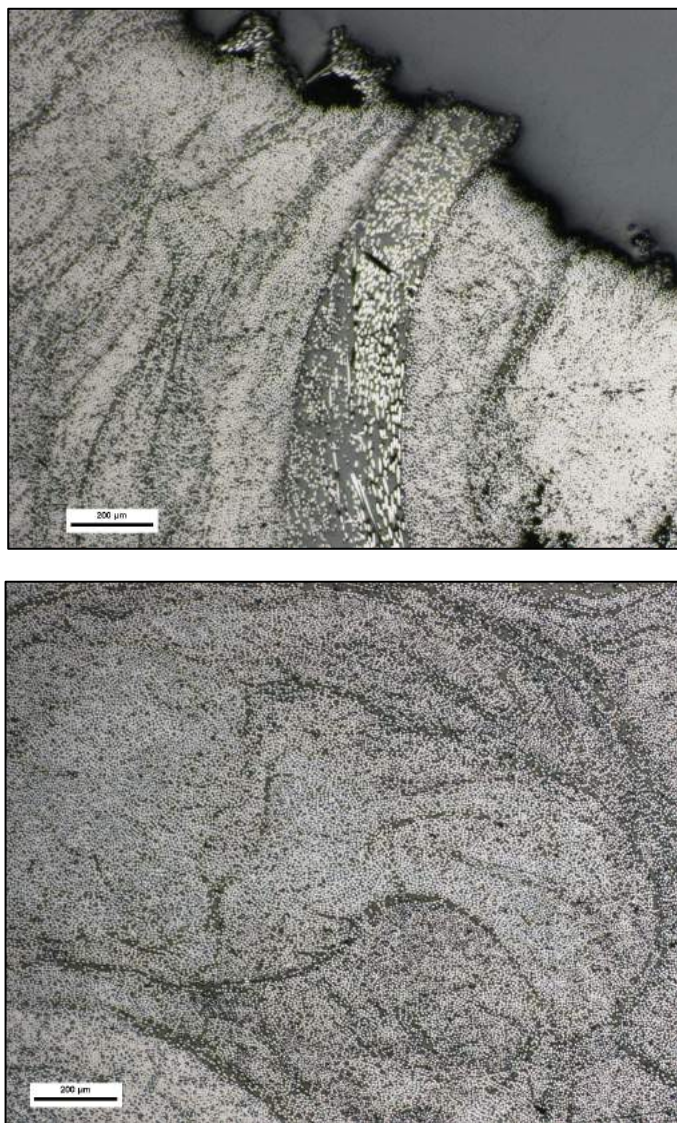


Fig. 3.45.- MO/CA\_20/60d. Arriba, Interfaz núcleo geometría superficial. Abajo, núcleo de la barra.

Al aumentar la duración, se observa que a 20 °C no se aprecian alteraciones en el núcleo, pero sí se observan irregularidades en la interfaz.



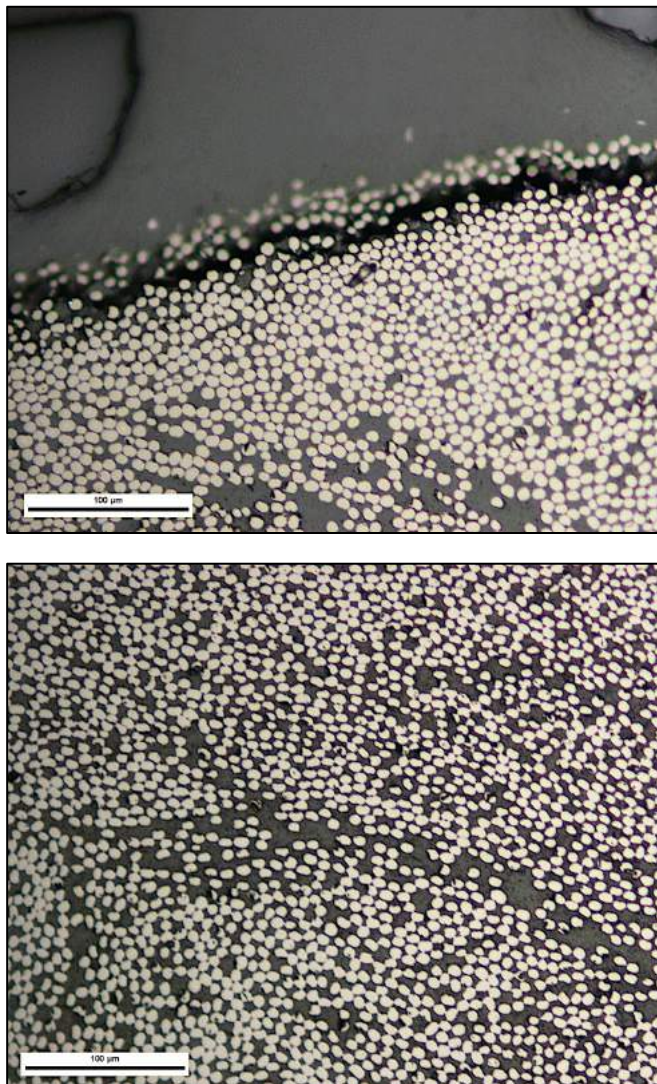
Condiciones de Temperatura durante 60 días y 50° C

Fig. 3.46.- MO/CA\_50/60d. Arriba, Interface núcleo geometría superficial. Abajo, daños en zona interfaz.

Condiciones de Temperatura durante 60 días y 80° C



A 80 °C se comienza a resentir incluso el núcleo de la barra. No de manera generalizada, pero sí aparecen grietas, que se analizan en el capítulo siguiente.

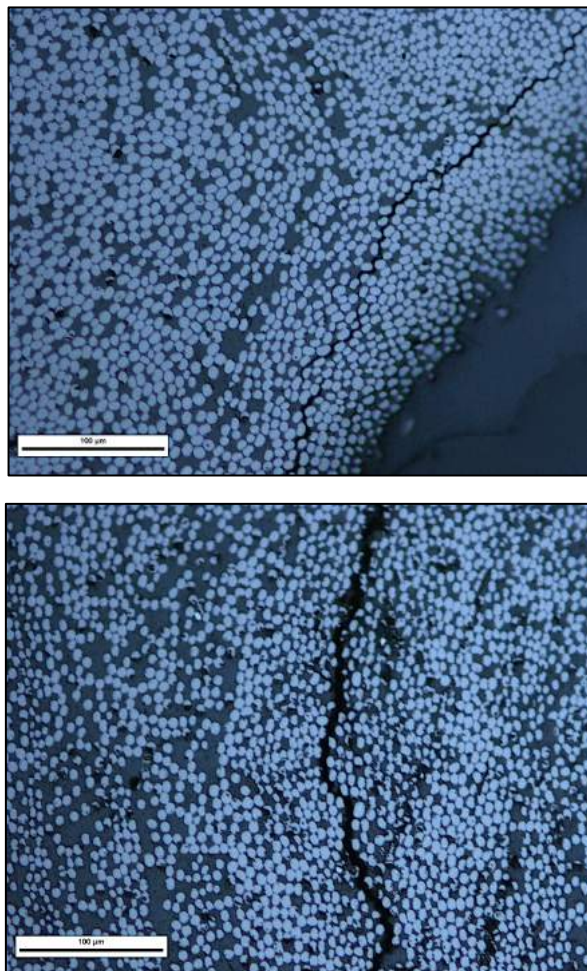


Fig. 3.47.- MO/CA\_80/60d. Arriba, Interface núcleo geometría superficial, donde se observa agrietamiento entre fibras. Abajo, daños en zona de núcleo con agrietamiento en resina.

Condiciones de Temperatura durante 180 días y 20° C

En la máxima edad estudiada en esta investigación se aprecian varios aspectos interesantes. El primero es la marcada diferencia de texturas percibidas en la interfaz. Como se ha citado en el estado del arte, la humedad puede afectar a la resina que forma la matriz polimérica (Parkyn, 1985; Rao, 1981), y, de manera más acusada, a la responsable de aglutinar el granulado de arena de sílice responsable de movilizar la adherencia.

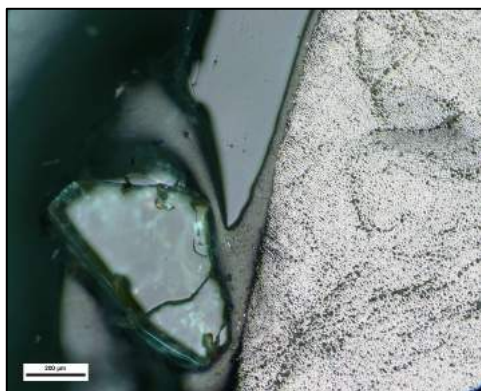
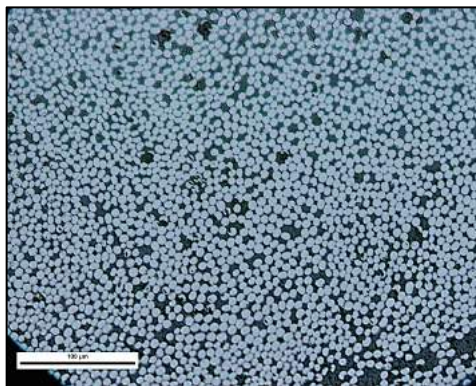


Fig. 3.48.- MO/CA\_180/20d. Arriba, Interfaz núcleo geometría superficial. Abajo, zona de núcleo de la barra.



El núcleo presenta algunas agrupaciones de fibra, lo que indica que la transferencia de esfuerzos desde la interfaz ha conseguido solicitar, en alguna medida, a las fibras del núcleo, con las consecuencias que se describen en el capítulo siguiente.

---

Condiciones de Temperatura durante 180 días y 50° C

La presencia de 50 °C durante 180 días permite observar el deterioro de la resina componente de la matriz polimérica en la interfaz, tal como se aprecia en la Fig. 3.49.

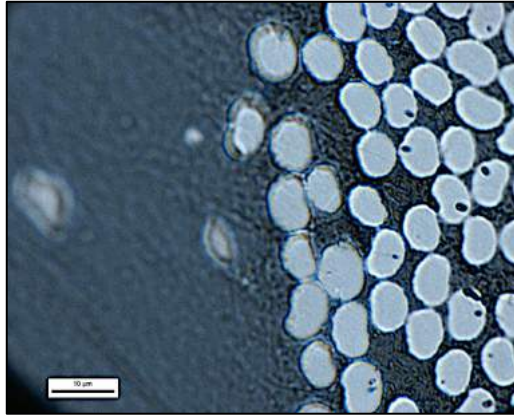
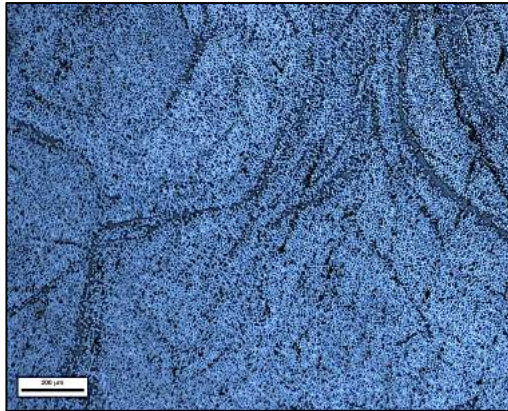


Fig. 3.49.- MO/CA\_180/50d. Arriba, daños en fibras y matriz en interface núcleo con geometría superficial. Abajo, fisuración de la matriz polimérica en núcleo de la barra.



En el núcleo de la barra, se percibe, a la escala de la Fig. 3.49 (abajo), la fisuración que está comenzando a aparecer de manera algo más perceptible.

Condiciones de Temperatura durante 180 días y 80° C

Este es el escenario más extremo de los analizados en esta investigación, y se confirma que los daños en interfaz son muy acusados, evidenciando en la Fig. 3.50 una agrietamiento con separación total del recubrimiento de arena con el núcleo de la barra.

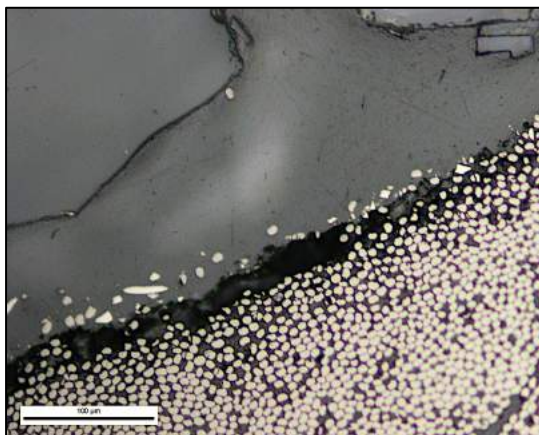
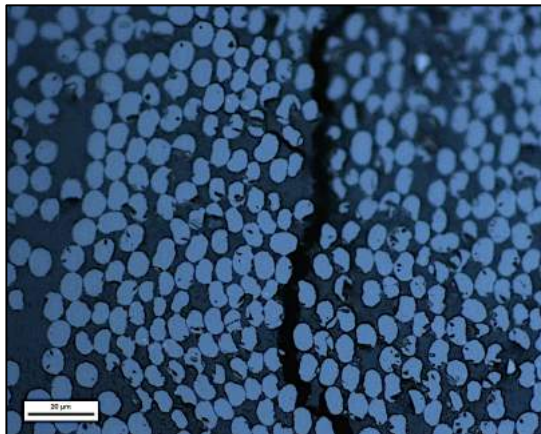


Fig. 3.50.- MO/CA\_180/80d. Arriba, daños severos en interfaz núcleo geometría superficial.  
Abajo, agrietamiento de la matriz polimérica en zona de núcleo de la barra.



También el núcleo manifiesta importantes daños en la resina, provocando el aplastamiento localizado de las fibras de carbono en el seno de la matriz polimérica.



### 3.6.2.2. *Imágenes Microscopía Óptica de barras de CFRP Corrugadas d12*

#### Condiciones de Temperatura durante 28 días y 20° C

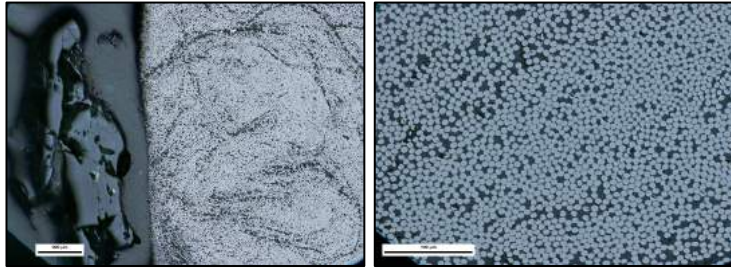


Fig. 3.51.- MO/CC\_20/28d. Izquierda, Interfaz núcleo/corruga. Derecha, núcleo de la barra.

#### Condiciones de Temperatura durante 28 días y 50° C

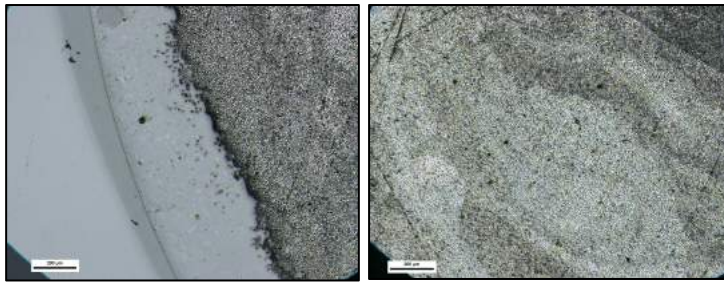


Fig. 3.52.- MO/CC\_50/28d. Izquierda, Interfaz núcleo/corruga. Derecha, núcleo de la barra.

#### Condiciones de Temperatura durante 28 días y 80° C

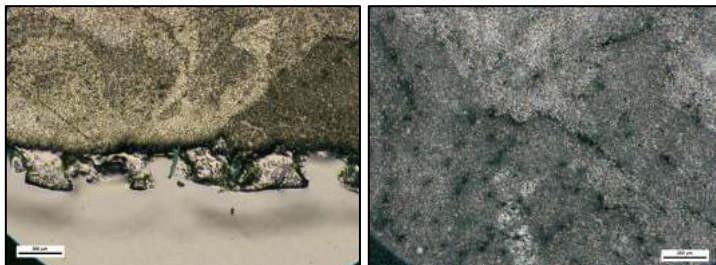


Fig. 3.53.- MO/CC\_80/28d. Izquierda, Interfaz núcleo / corruga. Derecha, núcleo de la barra, donde se aprecian focos más oscuros con daños en matriz polimérica.

### Condiciones de Temperatura durante 60 días y 20° C

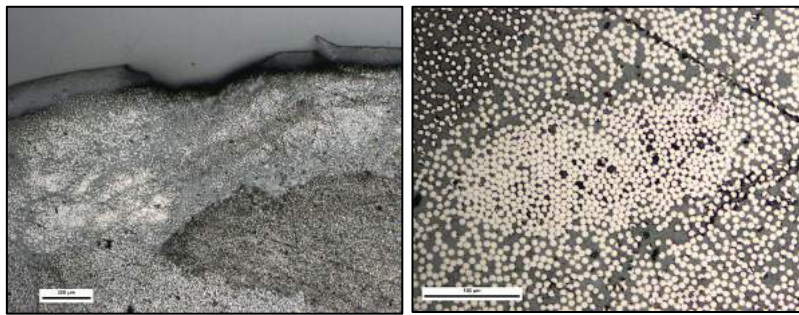


Fig. 3.54.- MO/CC\_20/60d. Izquierda, Interfaz núcleo/corruga. Derecha, núcleo de la barra.

### Condiciones de Temperatura durante 60 días y 50° C

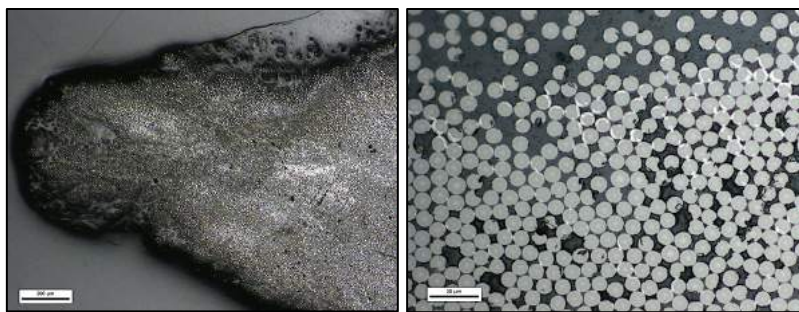


Fig. 3.55.- MO/CC\_50/60d. Izquierda, Ala de barra. Derecha, núcleo de la barra.

### Condiciones de Temperatura durante 60 días y 80° C

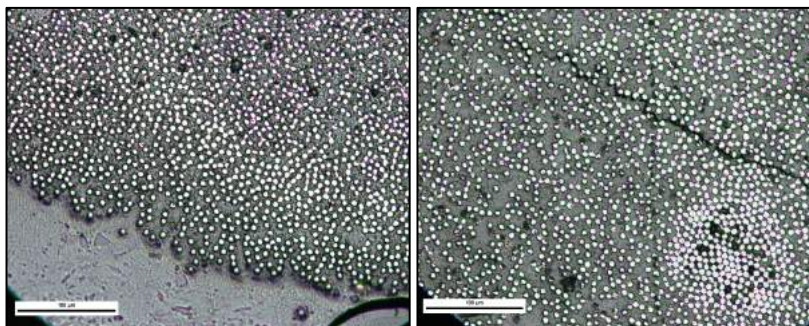


Fig. 3.56.- MO/CC\_80/60d. Izquierda, corruga. Derecha, núcleo de la barra, donde se aprecian daños en matriz polimérica y agrupación de fibras.

---

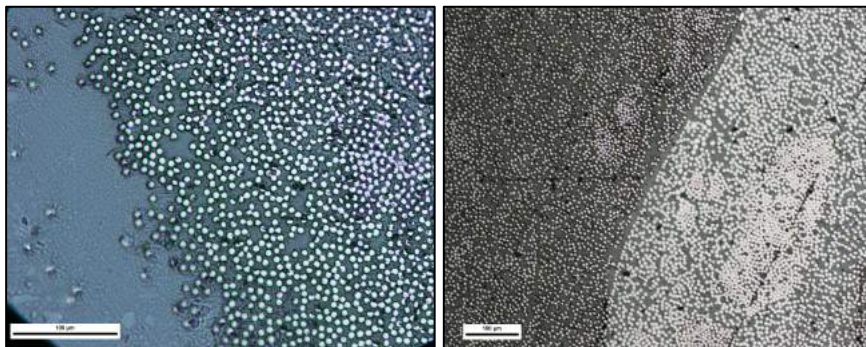
Condiciones de Temperatura durante 180 días y 20° C

Fig. 3.57.- MO/CC\_20/180d. Izquierda, zona corruga. Derecha, núcleo de la barra.

En la edad mayor del estudio, y en condiciones de saturación de humedad, no se percibe alteración significativa en interfaz. En la Fig. 3.57 se puede observar, asimismo, la transición del interfaz interior a núcleo de barra.

---

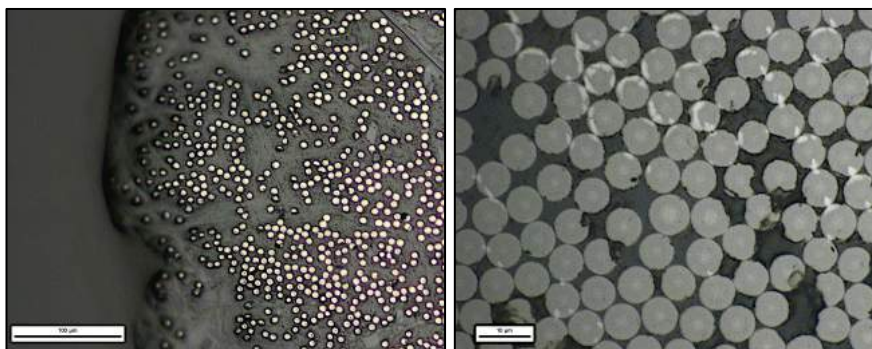
Condiciones de Temperatura durante 180 días y 50° C

Fig. 3.58.- MO/CC\_50/180d. Izquierda, zona ala de la barra. Derecha, núcleo de la barra.

Con el aumento de temperatura, comienza a percibirse el agrupamiento de fibras debido a la menor rigidez de la resina, lo que termina provocando el aplastamiento de fibras, como se confirmará con imágenes SEM a mayor aumento.



### Condiciones de Temperatura durante 180 días y 80° C

En la Fig. 3.59 se aprecian los daños en la zona del ala (zonas negras) son muy evidentes, así como la ruptura en la adhesión de los componentes de alas y corrugas con la matriz polimérica. Igualmente se percibe nítidamente el deterioro de la matriz polimérica, y su agrietamiento en núcleo de la barra.

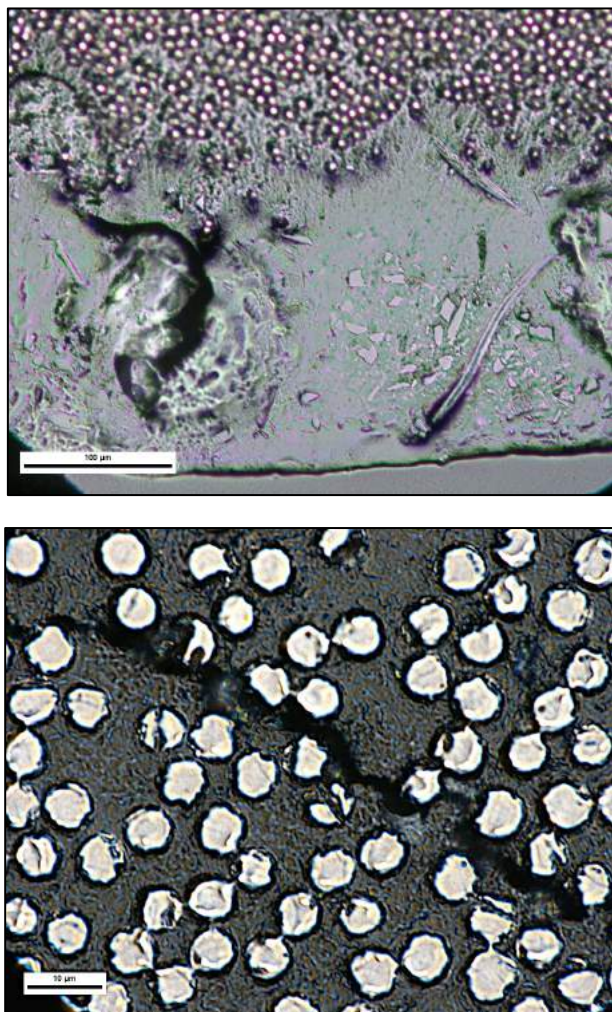


Fig. 3.59.-.- MO/CC\_80/180d. Arriba, daños en zona ala de la barra. Abajo, daños en fibras y matriz polimérica en núcleo de la barra.



### 3.6.3 Ensayos de Microscopía Electrónica de Barrido “SEM”

Los ensayos mediante microscopio óptico han aportado datos para el análisis, habiéndose ensayado barras que no fueron utilizadas en ensayo de pullout, pero sí sometidas a las mismas condiciones climáticas. En este caso, se realiza la toma de imágenes sobre las barras que formaron parte de las probetas de pullout. Es decir, se van a ensayar al microscopio electrónico secciones transversales que no solo han sido sometidas a las condiciones climáticas, sino que han sufrido las consecuencias de tensiones generadas en el ensayo de pullout. La utilización de esta técnica ha permitido una mayor aproximación al comportamiento microscópico de la fibras y la matriz polimérica, como se apreciará en las imágenes obtenidas.

Se han utilizado dos probetas de barras Arenadas d14 a 60 y 180 días, y en las tres condiciones climáticas, 20°, 50° y 80° C.

La nomenclatura utilizada ha sido:

#### **ENSAYO/****TIPO BARRA****\_****TEMPERATURA****/DÍAS**

**Tipo Ensayo:** MS (Microscopio Electrónico SEM)

#### **Tipo de Barra**

CC12: Barra CFRP Corrugada

CA14: Barra CFRP Arenada

#### **Condiciones de Temperatura**

20°, 50° y 80° C

#### **Días en condiciones climáticas**

60 y 180 días

Ejemplo:

**MS/CC12\_20/180d**

Para preparar adecuadamente las probetas se ha utilizado cortadora Remet modelo TR100 Evolution, y la cortadora de precisión Struers Accutom.

Seguidamente, se han preparado metalográficamente las probetas con resinas EpoxiFx de Struers, para terminar con la máquina pulidora.

Como se ha mencionado, estas muestras procedían de probetas ensayadas a pullout, seleccionando las que representan de manera más general a cada una de las tipologías de ensayo.

Para el ensayo se ha utilizado el microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM6300.

Las imágenes obtenidas corresponden a secciones transversales de la barra, haciendo tres enfoques: Núcleo de la barra, Interfaz núcleo/superficie y Superficie de la barra.

A continuación se muestran imágenes representativas de cada barra y temperatura, que ayudan a establecer los criterios para su posterior análisis.

Se han seleccionado una serie de imágenes en varias condiciones de temperatura, con diferentes niveles de aumento.

Como se puede apreciar, la barras sometidas al ensayo de pullout han sufrido daños internos, y con este ensayo de microscopía electrónica de barrido (SEM) se puede llegar a estudiar las causas y consecuencias de los mismos sobre los distintos componentes de las barras de CFRP, constatando, tal como se tratará ampliamente en el capítulo siguiente, la directa influencia de la temperatura a la que se han sometido las probetas.

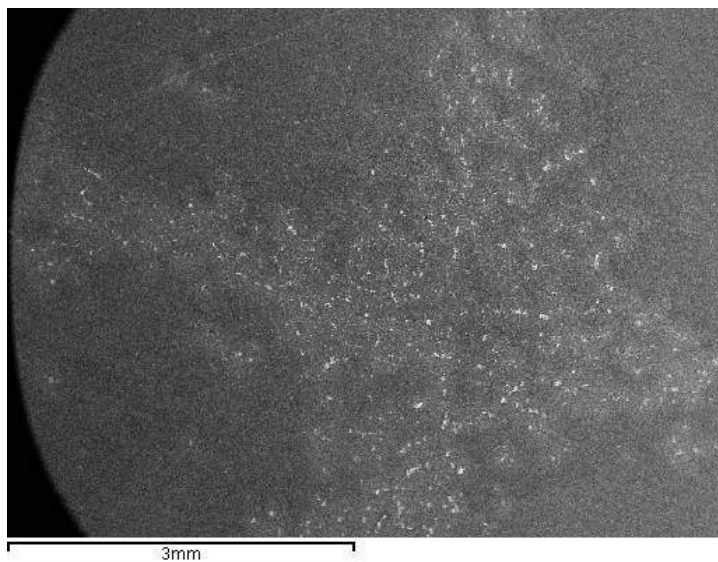


Fig. 3.60.- MS/CA\_20/180 x20 (se aprecia reordenamiento de fibras en x por las tensiones producidas en ensayo Pullout)

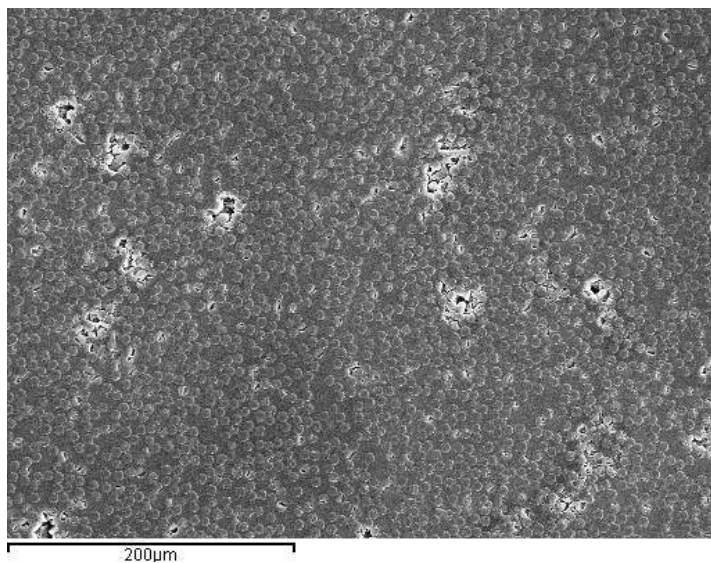


Fig. 3.61.- MS/CA\_20/180 x250 (con este aumento ya se observan zonas alteradas en matriz polimérica)

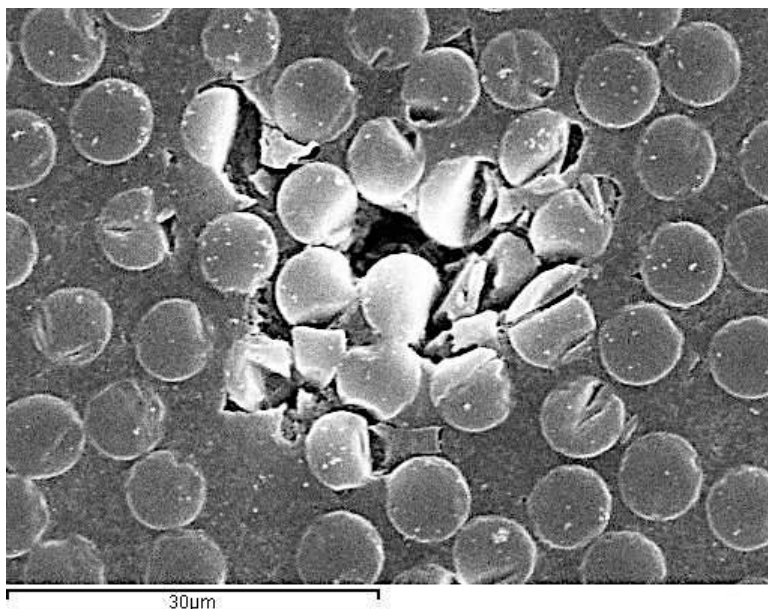


Fig. 3.62.- MS/CA\_20/180 x2000 (se observa que esas zonas alteradas en matriz polimérica también tienen destrucción de fibras)

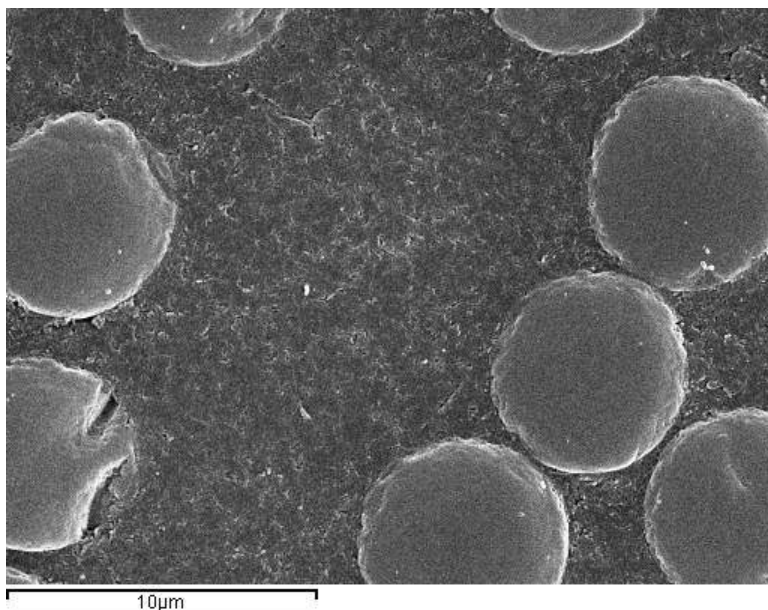


Fig. 3.63.- MS/CA\_20/180 x5000 (con este nivel de aumento se puede estudiar el comportamiento de la matriz polimérica de la barra)

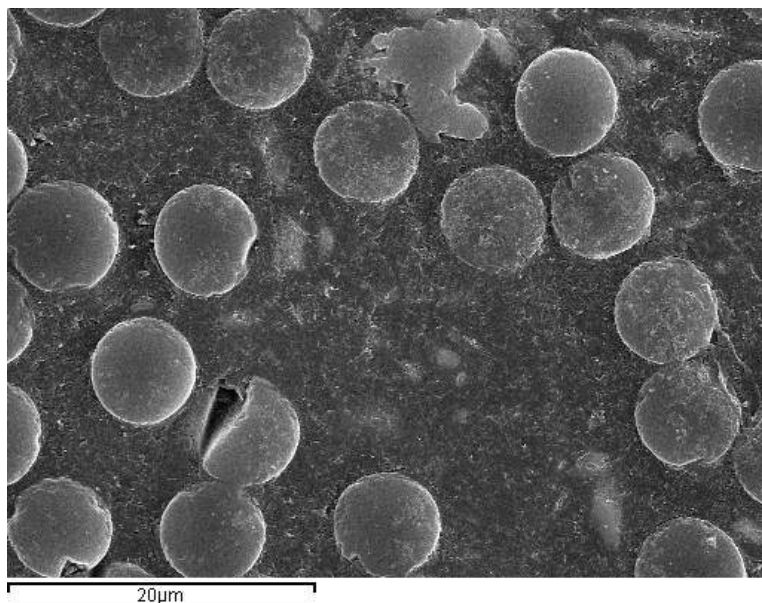


Fig. 3.64.- MS/CA\_80B/180 x2500 (se observa el interfaz, con los diferentes componentes en la matriz polimérica)

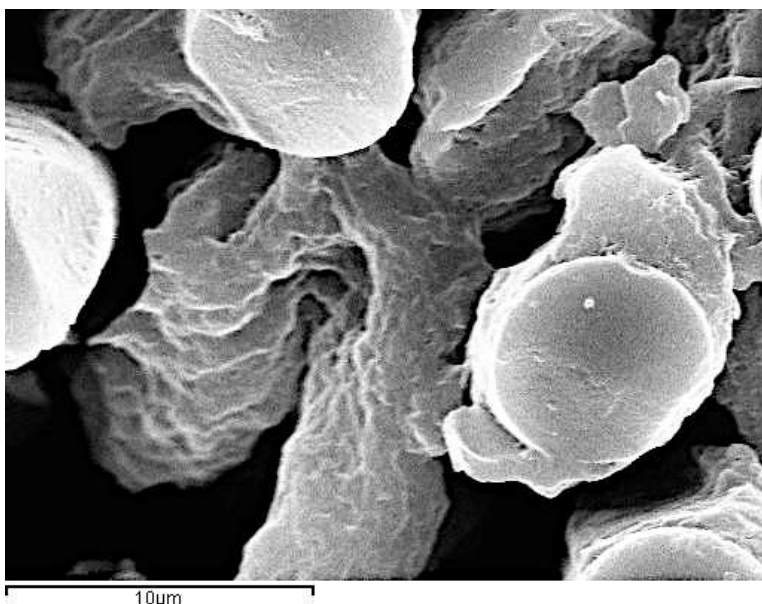


Fig. 3.65.- MS/CA\_80B/180 x5000 (se observa el severo deterioro de la matriz polimérica en una zona de la barra)

### 3.6.4 Ensayos de Microscopía de Fuerza Atómica AFM

Para completar los ensayos realizados, se ha utilizado el Microscopio de Fuerza Atómica (Atomic Force Microscope - AFM), mediante el que se pueden detectar fuerzas del orden de los nanonewton. Consiste en rastrear la superficie de la muestra, una probeta de la sección transversal de la barra de CFRP, con una sonda, que se mueve por toda de la topografía de la probeta.

En el caso del AFM utilizado, marca Veeco Multimode (Fig. 3.66) perteneciente al Laboratorio de Física Aplicada de la Universitat Politècnica de València, se ha llevado a cabo de forma pulsada, mediante el denominado *Tapping Mode*, y con un rastreador piezoeléctrico que mide la distancia y posición de la probeta con respecto a la punta.

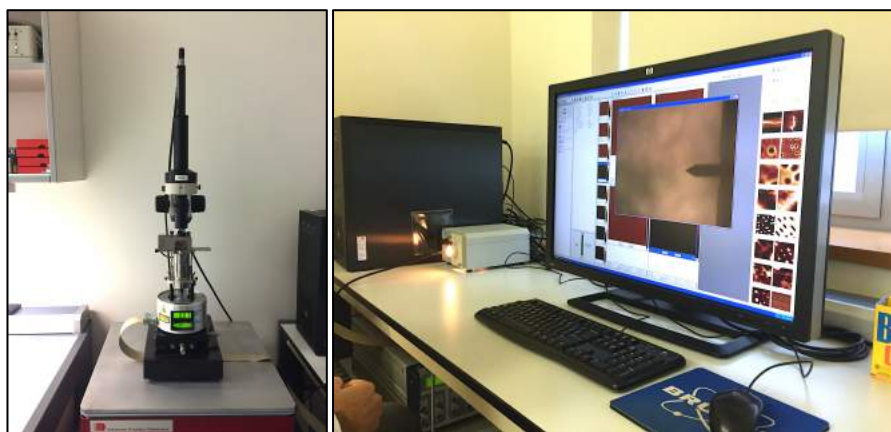


Fig. 3.66.- Izquierda, Microscopio de Fuerza Atómica; Derecha, visualización en pantalla de avance del ensayo, donde se aprecia la punta oscilante.

Debido al proceso necesario para la preparación de la muestra, y la extrema precisión en la medición de las alteraciones de la

superficie de la probeta, los resultados del ensayos sirven para evaluar el comportamiento de las fibras y la resina que forma la matriz polimérica tras ser sometido a las condiciones climáticas de 80°C durante 180 días. En este caso, únicamente se han seleccionado dos probetas, una de barras de CFRP Arenada y otra de barras de CFRP Corrugadas, en las condiciones citadas, debido a que son las que han estado sometidas a las condiciones más extremas de esta investigación.

Los datos obtenidos se han tratado con el software NanoScope Analysis v1.40r1, que permite observar una imagen virtual en 3D, seleccionar el enfoque deseado y obtener una imagen. Asimismo, permite analizar la composición de la superficie estudiada (Fig. 3.67 y 3.68).

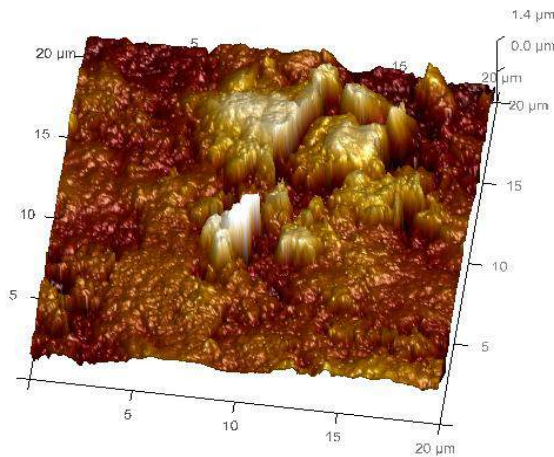


Fig. 3.67.- Imagen obtenida tras el ensayo AFM.



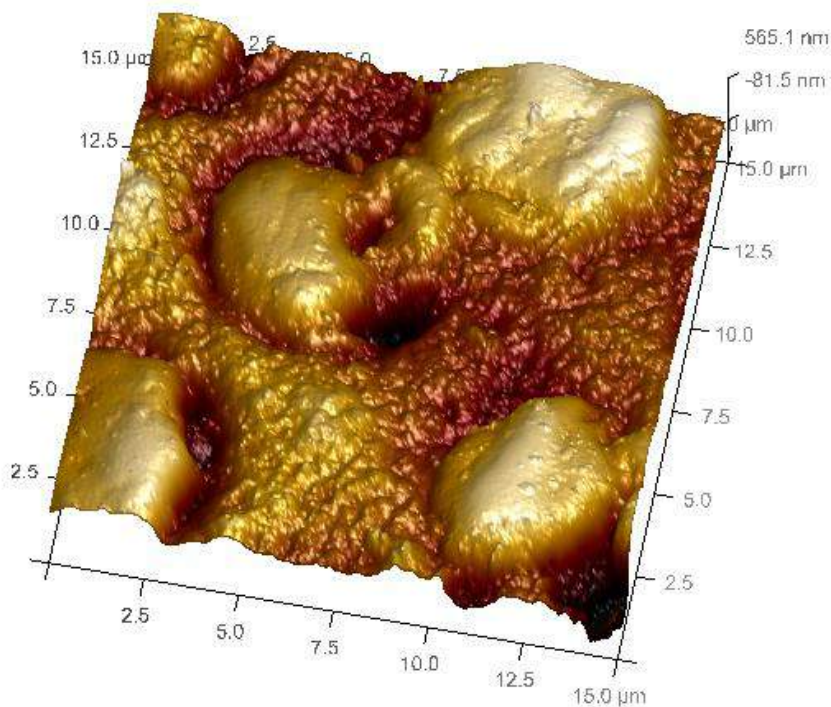


Fig. 3.68.- En esta imagen obtenida tras el ensayo AFM, los diferentes colores muestran variaciones en el material, distinguiéndose claramente las fibras y la matriz polimérica, así como los daños en ambos.

Con este ensayo complementarios se finaliza el capítulo dedicado al plan experimental y a la presentación de los resultados. Con la información recabada, se procede en el siguiente capítulo a analizar y discutirlos para establecer el modo en que las altas temperaturas y los tiempos prolongados han afectado a la adherencia de las barras de CFRP, con el objetivo de establecer una hipótesis de comportamiento en cada tipología de barra.



---

Para el análisis pormenorizado de los datos he ha utilizado el software MATLAB, buscando plantear ecuaciones que correlacionen los datos y sirvan como predicción de comportamiento de las barras de CFRP en condiciones similares a las estudiadas en esta investigación.



## 4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos realizados para esta investigación, se analiza la influencia que las altas temperaturas tienen sobre las diferentes barras de CFRP.

Se pretende establecer una predicción de la evolución de la Tensión Adherente de cada tipología de barra, y para ello se compararán las barras de CFRP Arenadas con las Corrugadas, y también con las de Acero.

Además de discutir la influencia de la Temperatura, se analizará cómo afecta cada uno de los diferentes tratamientos superficiales estudiados así como la resistencia del hormigón.

Dadas las edades analizadas, 28, 60 y 180 días se podrá determinar significativamente cómo afecta el aumento de la resistencia del hormigón en la adherencia.

### 4.1 Influencia de la Temperatura en el comportamiento adherente de las barras de CFRP

Las temperaturas analizadas han sido tres: 20 , 50 y 80 °C. Además, se han ensayados las probetas a 28, 60 y 180 días, lo que va a aportar conclusiones, también, en cuanto a la combinación de ambos factores, la temperatura y la duración en el tiempo de la misma.

Además, la edad del hormigón de las probetas va a determinar críticamente la resistencia a compresión del mismo; aun cuando este

efecto se compensará con la normalización de la tensión adherente, será interesante discutir si se consigue en su totalidad.

#### 4.1.1 Influencia de altas temperaturas en barras de Acreo Corrugado.

Se muestran en primer lugar unas gráficas que pretenden resumir los efectos de la temperatura sobre la Tensión Adherente Normalizada en función de la duración que las probetas han estado sometidas a dichas condiciones.

Se trata de una visión global que permite establecer un comportamiento general para cada tipología de barra que tal como se aprecia en la Fig. 4.1 siguen una evolución concreta.

Dado que la tensión adherente normalizada se calcula dividiendo la tensión máxima por la raíz cuadrada de la resistencia a Compresión del hormigón de la probeta, ello regula, en cierta medida, la diferencia que supone esa resistencia de compresión sobre la tensión adherente. Aun con ello, cuando las diferencias de resistencia son acusadas, consideramos que no terminan de ajustar adecuadamente el impacto que supone sobre la adherencia el aumento tan considerable de la resistencia a compresión del hormigón.

En esta investigación, con edades comprendidas entre los 28 días y los seis meses (180 días), la evolución de la resistencia del hormigón se ha mostrado determinante para evaluar adecuadamente la tensión adherente. Según se refleja en la Tabla 3.18 de la página 143, alcanza hasta un 50% más de resistencia a compresión a 180 días respecto de la que desarrolla a 28 días.

Por ello, también se aportarán las gráficas de la tensión máxima (sin normalizar), que ayudan a clarificar las tendencias.

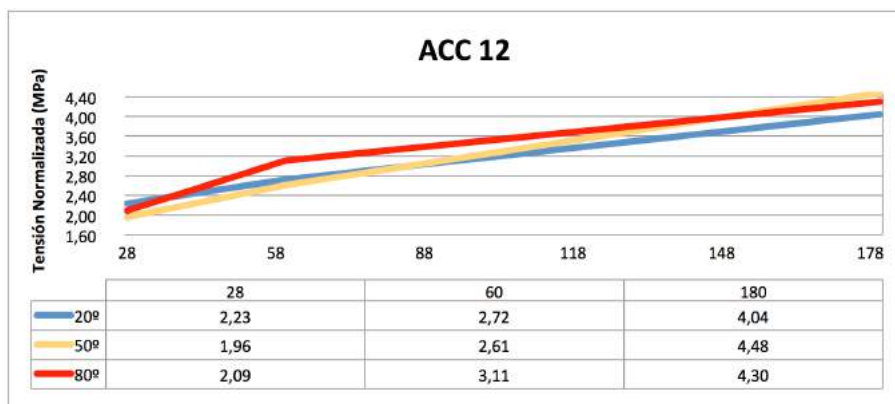


Fig. 4.1.- Gráficas de valores medios de tensión normalizada las probetas con barras de Acero d12 (ACC) ensayadas a Pullout, organizada por Temperatura y en función de las edades estudiadas en esta investigación.

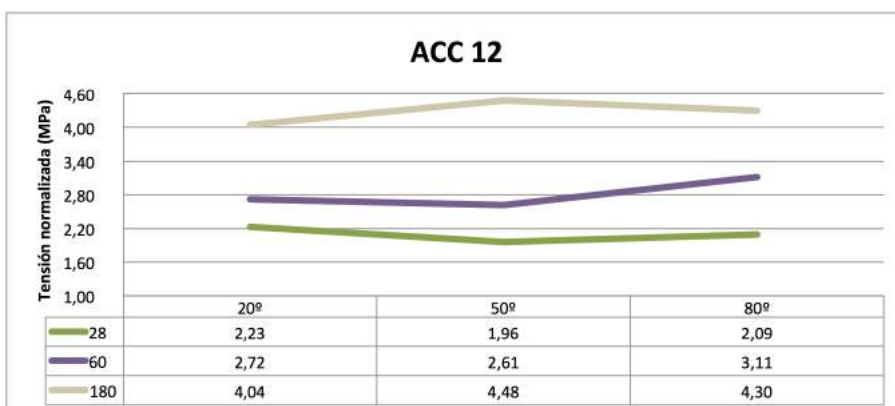


Fig. 4.2.- Gráfica de valores medios de tensión adherente normalizada de las probetas con barras de Acero d12 (ACC) ensayadas a pullout, organizada por Edad y en función de las temperaturas estudiadas en esta investigación.

Se ha realizado la comparativa de cada barra en función de los dos parámetros: Edad y Temperatura. En la Fig. 4.1 se muestra la evolución de la tensión adherente normalizada las probetas a una temperatura determinada y a lo largo del tiempo, y en la Fig. 4.2 se muestra cómo evoluciona la tensión adherente normalizada para cada edad en función de la temperatura.

Las barras de acero han evolucionado ganando tensión adherente con el paso de tiempo y en todas las condiciones de temperatura. Así, se han obtenido resultados a 20 °C de 2,23 MPa a 28 días, 2,72 MPa a 60 días y 4,04 MPa a 180 días. Las probetas a 50 °C han desarrollado 1,96 MPa a 28 días, 2,61 MPa a 60 días y 4,48 MPa a 180 días. Finalmente, a la máxima temperatura de esta investigación se ha repetido la tendencia, obteniendo 2,09 MPa a 28 días, 3,11 MPa a 60 días y 4,40 MPa a 180.

Considerando que dichos datos son de tensión normalizada, se muestran seguidamente las gráficas correspondientes a los valores máximos de tensión, para apreciar más acusadamente las tendencias de crecimiento por edad.

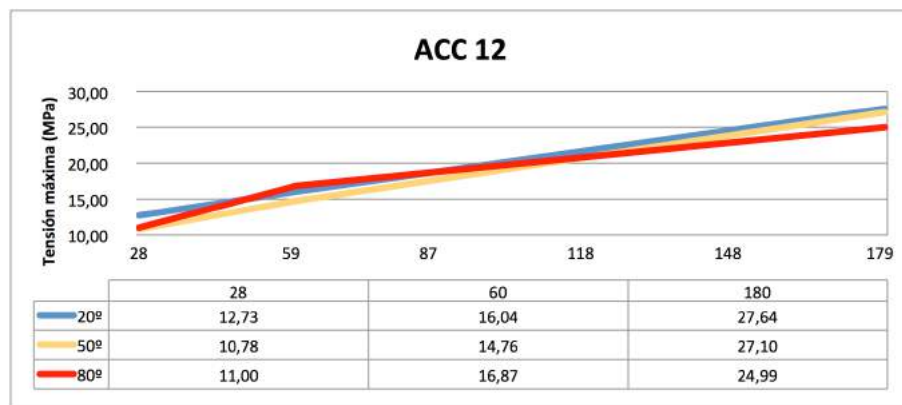


Fig. 4.3.- Gráficas de valores medios de tensión máxima las probetas con barras de Acero d12 (ACC) ensayadas a Pullout, organizada por Temperatura y en función de las edades estudiadas en esta investigación.

En la Fig. 4.3. se comprueba como la tendencia reflejada en la gráfica de tensión adherente normalizada (Fig. 4.1) se mantiene para la tensión adherente máxima, pudiendo percibir como las pendientes a temperaturas de 20 y 50 °C son prácticamente paralelas, en el caso de 80 °C la pendiente es mayor entre 28 y 60 días, para disminuir a edades más avanzadas.

Si se analiza la evolución de la tensión adherente máxima según la edad en función de la temperatura, se obtienen los datos representados en la Fig. 4.4, donde se puede observar cómo a mayor edad se dan mayores resistencias para cada una de las temperaturas.

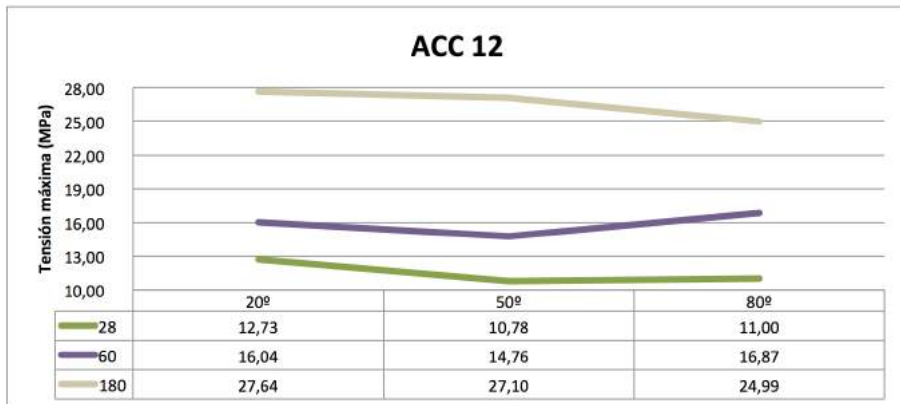


Fig. 4.4.- Gráfica de valores medios de tensión adherente máxima de las probetas con barras de acero d12 (ACC) ensayadas a pullout, organizada por Edad y en función de las temperaturas estudiadas en esta investigación.

Es interesante estudiar lo que ocurre con los deslizamientos inducidos por la tensión adherente en las barras acero a diferentes temperaturas y edades. Para ello, las gráficas representadas seguidamente nos muestran cómo evolucionan en cada una de las diferentes edades de estudio.

Como se observa en las gráficas a 28 días (Fig. 4.5), las mayores tensiones adherentes se obtienen a 20 grados, siendo muy superiores a las tensiones alcanzadas en condiciones de 50 y 80 °C. En cambio, sí se aprecian unas pendientes similares en todas las temperaturas, lo que indica que el mecanismo adherente es similar independientemente de la temperatura.

A 60 días se observa cómo la diferencia de Tensión Adherente va disminuyendo entre las diferentes temperaturas (Fig. 4.6), lo que se debe a la mayor resistencia a compresión del hormigón, que activa el

efecto “confinamiento “ y una mayor resistencia por anclaje mecánico de las corrugas de la barra.

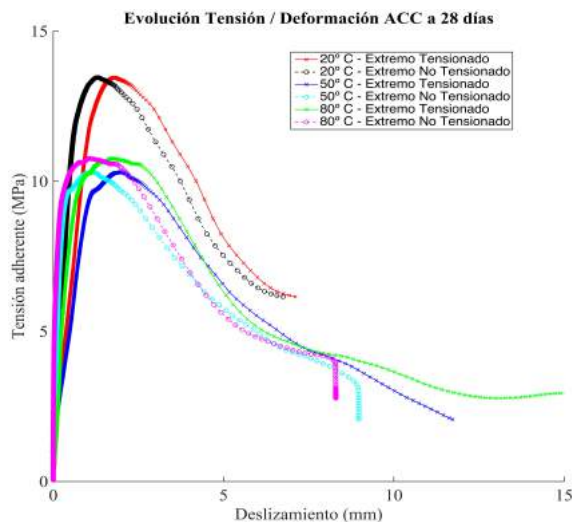


Fig. 4.5.- Gráfica de comportamiento adherente de las barras de Acero en ensayo pullout a 28 días, con temperaturas de 20, 50 y 80 °C.

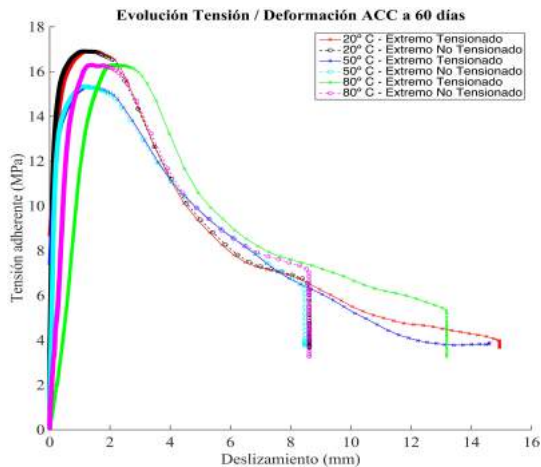


Fig. 4.6.- Gráfica de comportamiento adherente de las barras de Acero en ensayo pullout a 60 días, con temperaturas de 20, 50 y 80 °C.



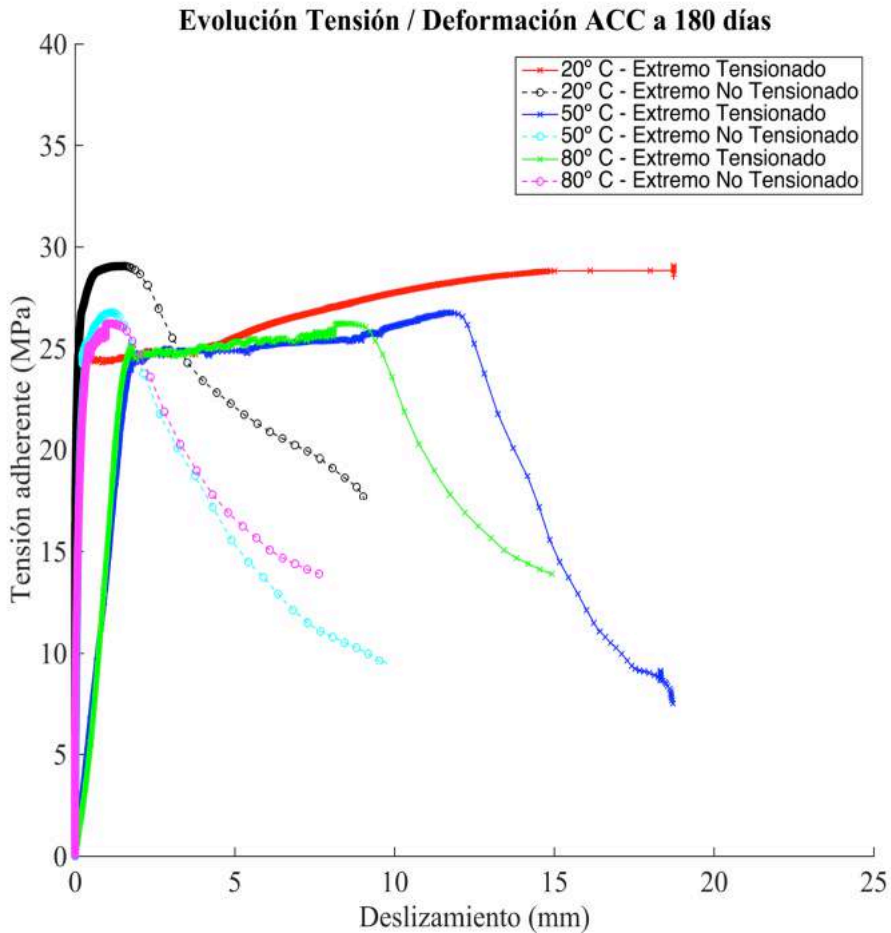


Fig. 4.7.- Gráfica de comportamiento adherente de las barras de acero en ensayo pullout a 180 días, con temperaturas de 20, 50 y 80 °C.

A 180 días (Fig. 4.7) se comprueba que este efecto, la influencia de la resistencia a compresión del hormigón es tan acusado que los desplazamientos en extremo tensionado de las barras de acero perfilan fielmente la gráfica tensión/deformación de una barra de acero en ensayo de tracción. Es decir, como se aprecia en las gráficas en las tres temperaturas de estudio y con los captadores de deslizamiento en el extremo tensionado (en el que se mide, además del desplazamiento de la barra dentro del hormigón, la elongación del

acero, las líneas de color rojo, azul y verde) la barra de acero supera el límite elástico, pasa por el escalón de cedencia y entra en régimen plástico; pero es importante matizar que no se produce rotura de la barra, sino que el régimen plástico aun moviliza la tensión adherente suficiente como para romper por pullout. Este mismo efecto se pudo percibir en la pantalla de los equipos de medida del ensayo, tal como recoge la Fig. 4.8.

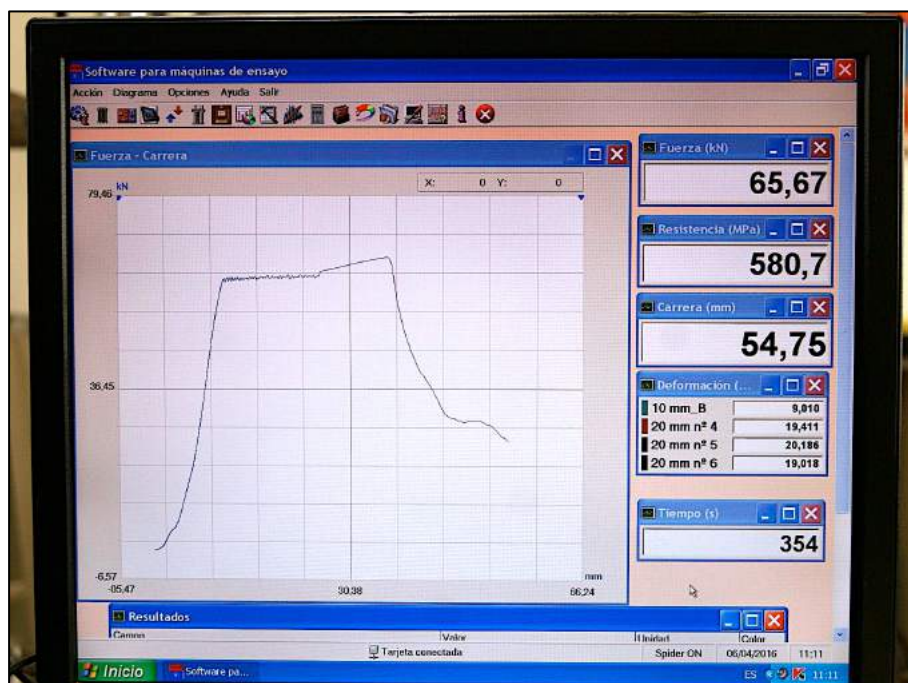


Fig. 4.8.- Pantalla de los equipos de medida de la prensa de ensayo a Pullout en la que la gráfica tensión adherente y desplazamiento se asemeja a la gráfica tensión/deformación del acero ensayado a tracción, y en la que se aprecia el paso de régimen elástico a plástico de la barra de acero.

Para comprobar cómo se ha producido el fenómeno de la adherencia, se estudia la tensión adherente cuando el desplazamiento es de 0.01 mm en el extremo no tensionado de la barra. Se elige este valor por suponer un inicio perceptible del desplazamiento, lo que

moviliza otros mecanismos de adherencia, diferentes y específicos de cada tipología de barra.

No se utiliza el desplazamiento extremo tensionado para que la elasticidad de la barra no distorsione los resultados con mayores desplazamientos al incluir la propia elongación elástica de la barra, tal como hemos visto en las figuras 4.7 y 4.8.

Como se indicó en el apartado 2.7.1 de este trabajo, los mecanismos de adherencia de las barras desarrollados durante los ensayos de pullout pueden ser por Adhesión Química, por Rozamiento y por Acuñamiento Mecánico combinado con Rozamiento.

En la Fig. 4.9 se han representado apilados los porcentajes de cada tipo de adherencia desarrollada en las barras de acero (tal como se realiza en otros estudios consultados), y que, según se ha descrito anteriormente, supone que la tensión adherente movilizada hasta desplazamiento de 0.01 mm es debida a adherencia química inicial, para seguir hasta la tensión máxima adherente con adherencia por acuñamiento mecánico combinado con rozamiento.

Se observa en la gráfica a 28 días que el % de tensión adherente alcanzada mediante adhesión química es bajo (de 18,20% a 21,60%) con relación a la tensión máxima desarrollada, lo cual es una constante en el resto de edades y a cualquier edad, y que se puede establecer como criterio general.

Como se observa en las gráficas a 60 y 180 días, este rango no varía *grosso modo*, lo que confirma que la adherencia química entre la barra de acero corrugado y el hormigón no es el principal modo de anclaje, sino, como se observa claramente en las Fig. 4.5, 4.6 y 4.7 es el acuñamiento mecánico, fundamentalmente, el responsable de garantizar la adherencia barra/hormigón; y a 180 días, como se ha mencionado, cumple su función de manera excelente, llevando a la barra más allá del límite elástico.

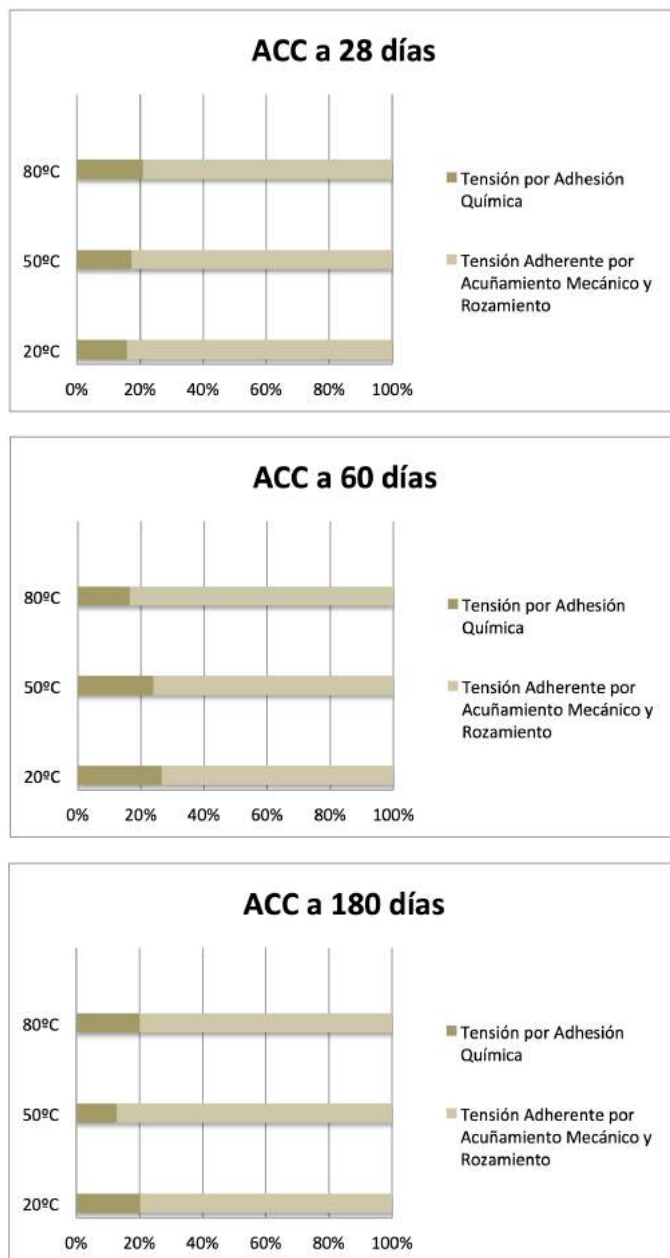


Fig. 4.9.- Gráficas de porcentajes apilados para barras de Acero d12, por tipo de adherencia movilizada en los ensayos de pullout.

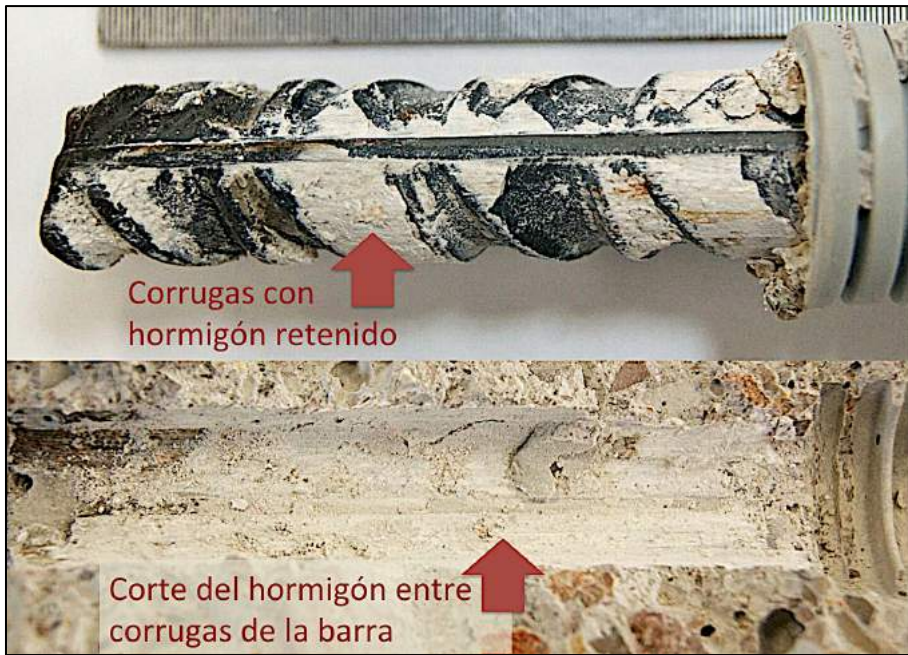


Fig. 4.10.- Modo de rotura pullout, por arrancamiento del anclaje mecánico entre corrugas.

Como se observa en la Fig. 4.10 la adherencia desarrollada por las barras de acero corrugado en las probetas de pullout consiste en el anclaje mecánico por acúñamiento de las corrugas. En la figura se muestra la probeta ACC180/50B, donde la adherencia desarrollada forzó a la barra a superar el límite elástico para, ya en fase plástica, conseguir cortar el hormigón entre corrugas del resto del hormigón y arrancar la barra de la probeta de hormigón (Fig. 4.11).



Fig. 4.11.- Imágenes microscopio digital de barra acero ensayada con hormigón colmatando los espacios entre corrugas.

Mientras en las probetas con barras de Acero se observa una similitud con las pendientes de las gráficas al aumentar la temperatura y la edad, se constatará más adelante que la evolución en las barras de CFRP es diferente para cada estado, incluso invirtiendo la tendencia en el caso de las barras de CFRP Corrugadas.

4.1.2 Influencia de altas temperaturas en barras de CFRP arenadas

Como se ha comprobado con las barras de acero, además de la temperatura, la resistencia a compresión del hormigón es determinante en el desarrollo de tensiones adherentes en las probetas de pullout a edades avanzadas.

Para analizar el impacto de las altas temperaturas en las barras de CFRP arenadas, en la gráfica de la Fig. 4.12 se refleja la evolución de las tensiones adherentes normalizadas para una misma temperatura y a lo largo del tiempo. Se aprecia una similitud notable en las tensiones a 50 y 80 °C, pero no así a 20 °C, donde aparece una pendiente prácticamente nula, sin apenas variación en el tiempo.

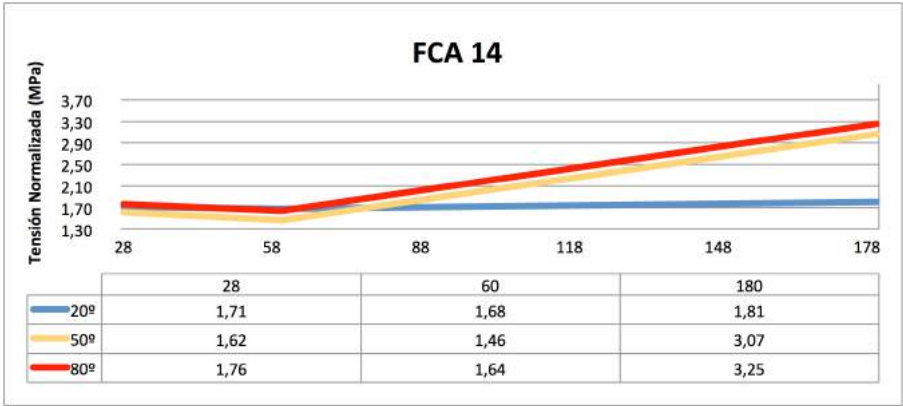


Fig. 4.12.- Gráfica de valores medios de tensión normalizada de las probetas con barras de CFRP Arenadas d14 (FCA) ensayadas a Pullout, organizada por Temperatura y en función de las edades estudiadas en esta investigación.

Analizando las causas que pueden estar provocando esta situación, consideramos que puede deberse a las condiciones climáticas en que se han conservado todas las probetas de temperatura 20 °C. Dichas probetas han permanecido almacenadas durante todo el tiempo establecido en el ensayo en la cámara de curado. Esto se hizo así por varios motivos, el principal de ellos fue introducir el parámetro humedad en la investigación, y hacerlo en la temperatura menos relevante. Además, se consideró que era una situación potencialmente real para elementos estructurales situados en entornos de humedad saturada, debido a las excelentes propiedades de las barras de CFRP frente al agua.

Según lo visto en el apartado 2.6.2 de esta tesis en la página 49, el agua puede penetrar en las barras por capilaridad (Parkyn, 1985) y ello puede provocar un ablandamiento de la matriz polimérica que produciría la disminución de la resistencia y rigidez de la barra.

Pero este hecho no afecta del mismo modo a todas las resinas que pueden formar la matriz polimérica, sino que tiene mayor incidencia en las tipo Viniléster que en las Epoxi. Y este es el caso de la barras CFRP arenadas ensayadas, formadas por resinas de Viniléster.

En cualquier caso, en la Fig. 4.13 comprobamos el efecto con las tensiones adherentes máximas, sin normalizar, y vemos que, si bien se muestra un descenso de resistencia a 60 días respecto a 28, recupera y sigue ganado resistencia hasta los 180 días.



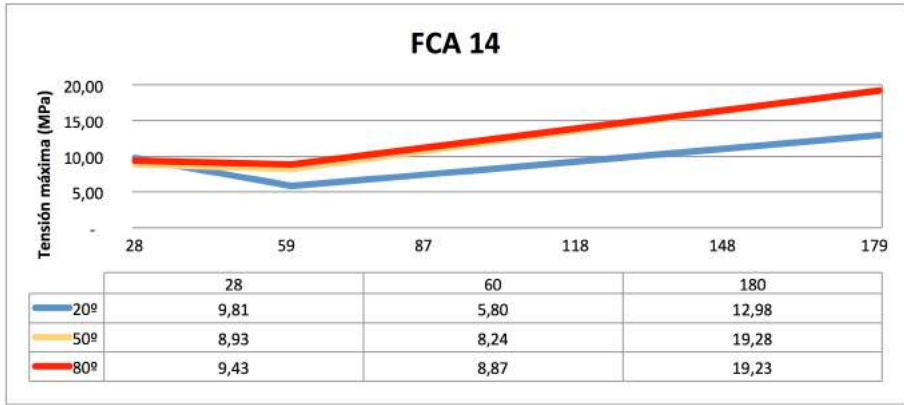


Fig. 4.13.- Gráfica de valores medios de tensión máxima de las probetas con barras de CFRP Arenadas d14 (FCA) ensayadas a Pullout, organizada por Temperatura y en función de las edades estudiadas en esta investigación.

Como se ha constatado en toda la investigación, la influencia de la resistencia a compresión de hormigón sigue condicionando los resultados, afectando a la tensión normalizada cuando las edades son muy diferentes, pues también lo son las resistencias a compresión del hormigón.

Para poder determinar más exactamente qué ha sucedido en las barras de CFRP arenadas a 20 °C, formado parte de probetas en condiciones de saturación de humedad, comparamos con las gráficas de las barras de CFRP corrugadas, pues también están formadas por resinas de Viniléster. Como se verá en la Fig. 4.34, no es apreciable este efecto.

En la Fig. 4.14 se aprecia la diferente coloración del interior de las probetas, una vez ensayadas, donde se aprecia la humedad aun evidente en la imagen de la derecha frente a la de la izquierda. Esa humedad constantemente en contacto con la barra de CFRP arenada puede ser la responsable de que la evolución de tensión adherente desde 28 a días a 180 haya sido prácticamente nula.



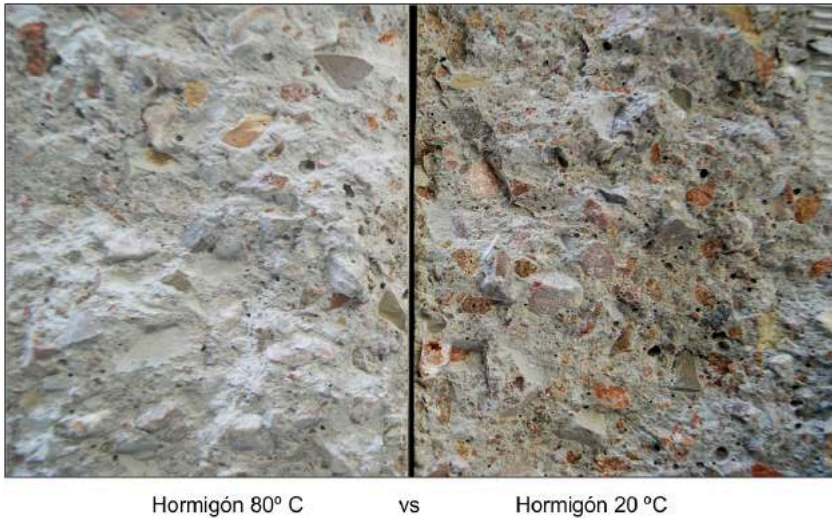


Fig. 4.14.- Imágenes tomadas inmediatamente después de ensayar a pullout dos probetas, la de la izquierda habiendo estado 180 días a 80 °C y la de la derecha 180 días a 20 °C y saturada de humedad.

Analizando la tipología de barras, concluimos en que mientras las barras de CFRP corrugadas desarrollan la mayor parte de tensión adherente mediante anclaje mecánico (Tabla 3.11 en la página ), las CFRP Arenadas lo desarrollan por adherencia del recubrimiento (Tabla 3.9).

Además, la porosidad en la capa superficial de las barras de CFRP arenadas es más porosa que las CFRP Corrugadas, que coincide con ser la más importante en las barras de CFRP arenadas para garantizar la adherencia. Así pues, el potencial debilitamiento de la matriz polimérica en la parte más exterior de la barra, la que forma el recubrimiento arenado con sílice, puede ser la causa de que la tensión normalizada no se incremente con la edad, manteniendo las tensiones de adherencia iniciales.

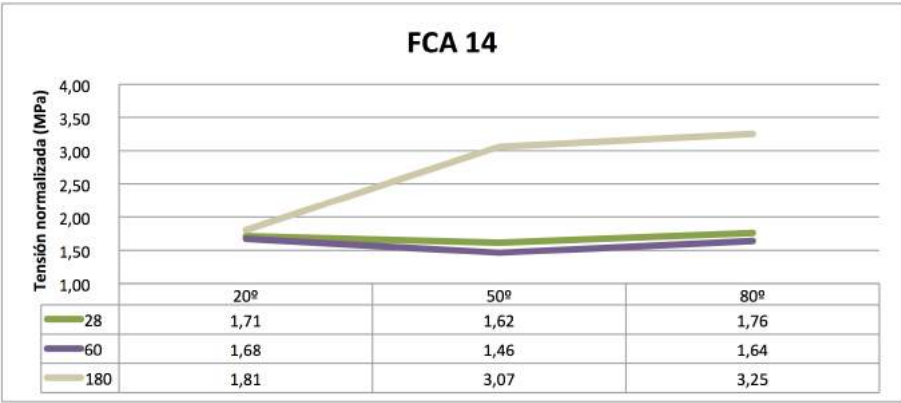


Fig. 4.15.- Gráfica de valores medios de tensión adherente normalizada de las probetas con barras de CFRP Arenadas d14 (FCA) ensayadas a pullout, organizada por Edad y en función de las temperaturas estudiadas en esta investigación.

La Fig. 4.15 muestra los valores de la tensión normalizada ordenados por edades, y se aprecia el hecho de estancamiento de tensiones de adherencia a 20 °C, prácticamente invariable con la edad, posiblemente debido a la saturación de humedad.

A 28 y 60 días tampoco tiene una incidencia importante la temperatura, mientras que a 180 días sí que aparece un aumento de la tensión adherente normalizada a 50 y 80 °C, debido al efecto complementario de la edad y mayor resistencia a compresión del hormigón anteriormente comentado. Es decir, no se trata de un aumento real de la tensión admisible desde los 20 °C a 80 °C, sino que para la temperatura de 20 °C, debido a las condiciones de humedad, la tensión adherente desarrollada pudo verse afectada por los daños en la resina de la interfaz, provocando bajos valores resistentes.

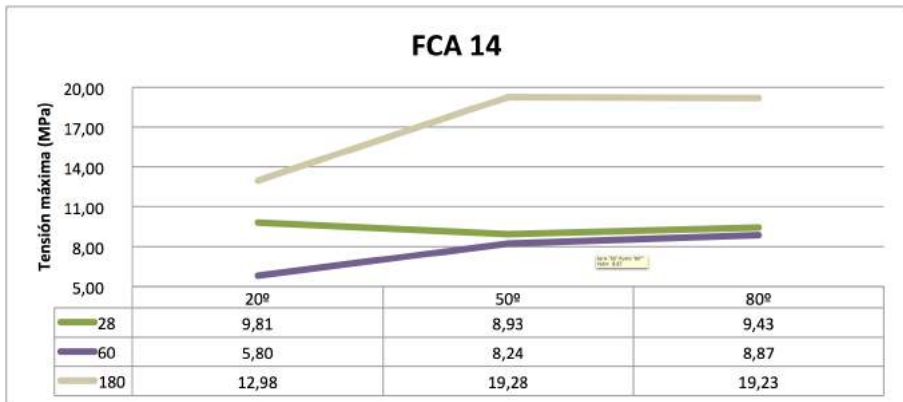


Fig. 4.16.- Gráfica de valores medios de tensión adherente máxima de las probetas con barras de CFRP arenadas d14 (FCA) ensayadas a pullout, organizada por Edad y en función de las temperaturas estudiadas en esta investigación.

Para completar la información, se muestra en la Fig. 4.16 la gráfica con valores de tensión adherente máxima, donde, nuevamente, se constata que la edad y resistencia adquirida del hormigón a compresión aumentan el efecto “confinamiento” provocando un incremento de la tensión adherente máxima atribuible únicamente a la edad, y por ello, a la resistencia a compresión del hormigón, pues se observa la pendiente nula en la evolución de 50 a 80 °C.

Con todo ello, se puede concluir según estas gráficas que la temperatura hasta 80 °C no tiene una especial incidencia en el comportamiento adherente de las barras de CFRP Arenadas, no influyendo ni en sus valores de tensión ni en sus mecanismos adherentes.

En la Fig. 4.17 se observa cómo a los 28 días, el recubrimiento de arena de las barras está totalmente desprendido de la barra, mientras que a los 180 días, se conserva gran parte del mismo adherido al núcleo de la barra, lo que supone una mejora en el mecanismo de adherencia por rozamiento que, como se verá más adelante, contribuye en menor medida a la adherencia que los procesos químicos, y esto puede suceder debido al confinamiento

producido por la alta resistencia a compresión del hormigón, dado que ambas muestras son a 80° de temperatura.

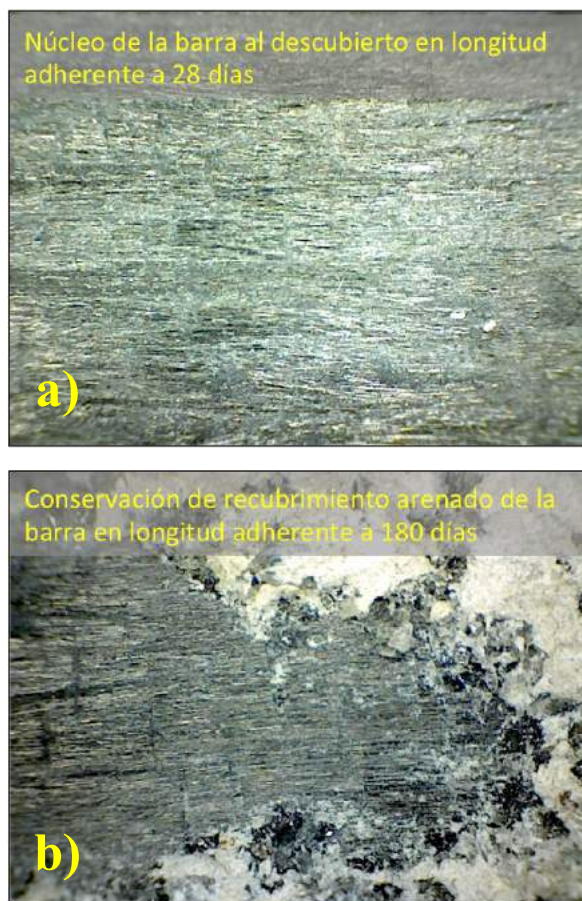


Fig. 4.17.- a) Imagen de la superficie de la longitud adherente en barras de CFRP arenadas ensayada a 28 días a 80 °C. b). Imagen de la superficie de la longitud adherente en barras de CFRP arenadas ensayada a 180 días a 80 °C

Para tener una mayor comprensión del mecanismo de adherencia de las barras de CFRP Arenadas, considerando que existe una adherencia química inicial hasta que es perceptible el desplazamiento en extremo no tensionado, y que se ha establecido en 0,01 mm, se presenta una gráfica porcentual apilada con todos los datos para cada edad y temperatura (Fig. 4.18).

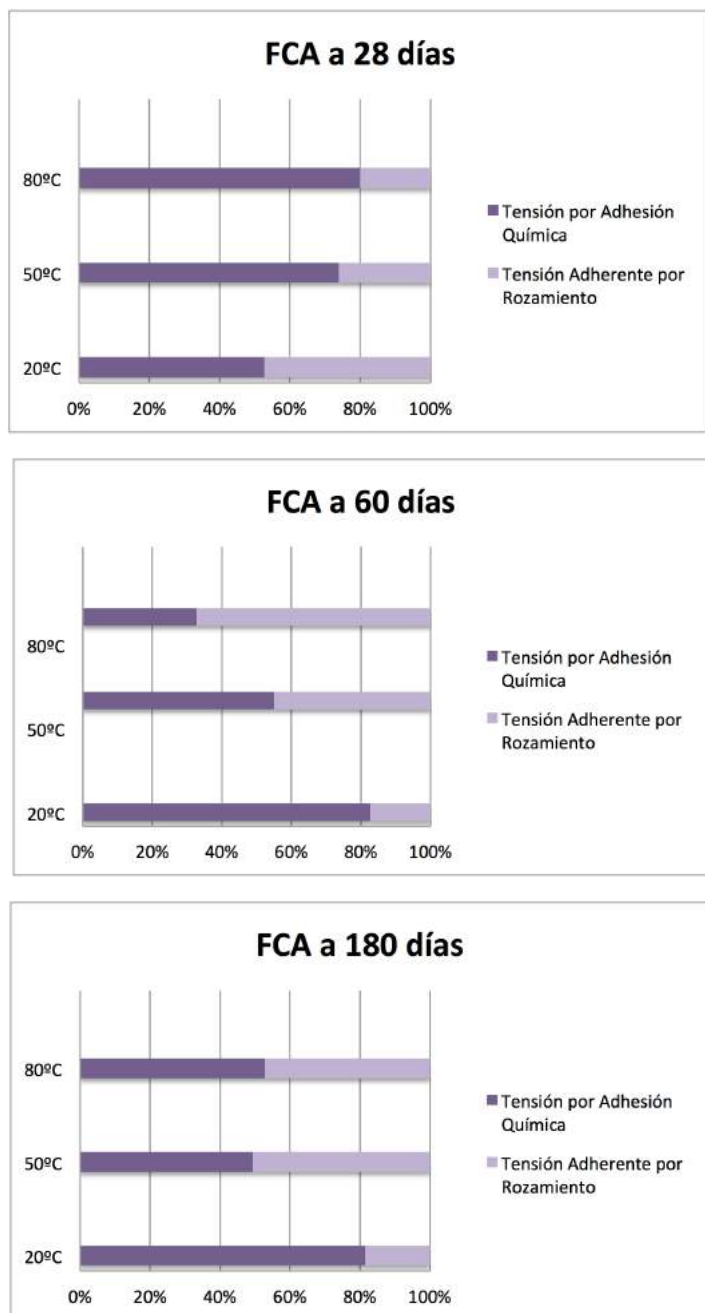


Fig. 4.18.- Gráficas de porcentajes apilados para barras de CFRP Arenadas d14, por tipo de adherencia movilizada en los ensayos de pullout.

Tal como se avanzaba, se confirma que la adhesión química es muy superior en este tipo de barras que en el acero. Así, varían desde un 27,70% llegando hasta el 82,30%, siendo la principal responsable del comportamiento adherente de la barra, pues el arenado provoca una adhesión mayor, que llega casi hasta la rotura.

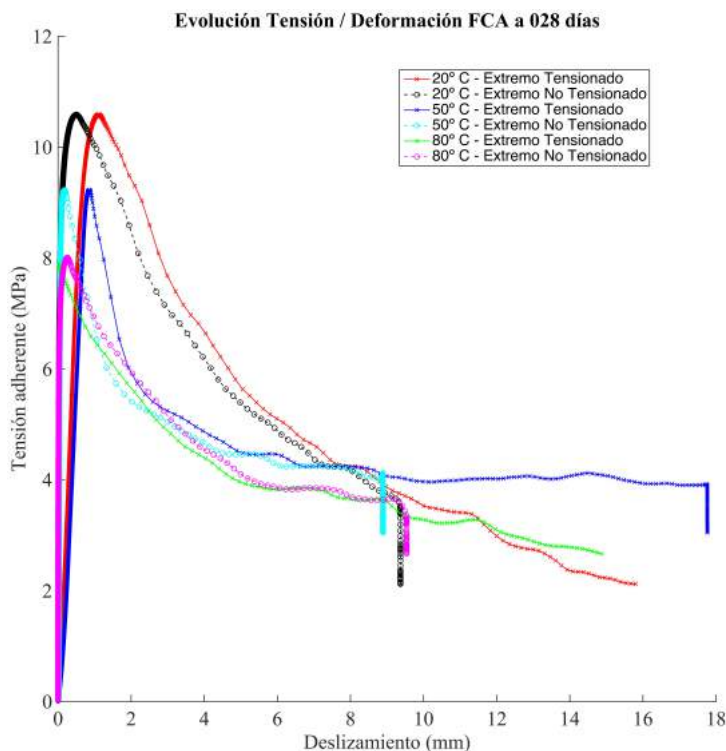


Fig. 4.19.- Gráfica de comportamiento adherente de las barras de CFRP Arenadas en ensayo pullout a 28 días, con temperaturas de 20, 50 y 80 °C.

Se comprueba en la Fig. 4.19 la acusadísima pendiente, sobre todo en las gráficas correspondientes al deslizamiento del extremo no tensionado (colores magenta, cian y negro), lo que debe interpretar como una deformación frágil y muy rígida. Como se aprecia, al llegar a tensión adherente máxima, la caída se produce con

casi la misma pendiente, pero en sentido contrario. Es decir, que la rotura de adherencia es rápida y casi total.

El posible efecto de la humedad en la tensión adherente se percibe en la Fig. 4.20, cuando se procede a ensayar a 180 días, y se comprueba cómo las probetas que se han mantenido a 20 °C en la cámara de curado saturadas de humedad no han conseguido seguir creciendo de manera significativa (colores rojo y negro); en contraposición, las probetas que han estado en cámaras climáticas a 50 y 80 °C, sí aumentan su tensión adherente máxima.

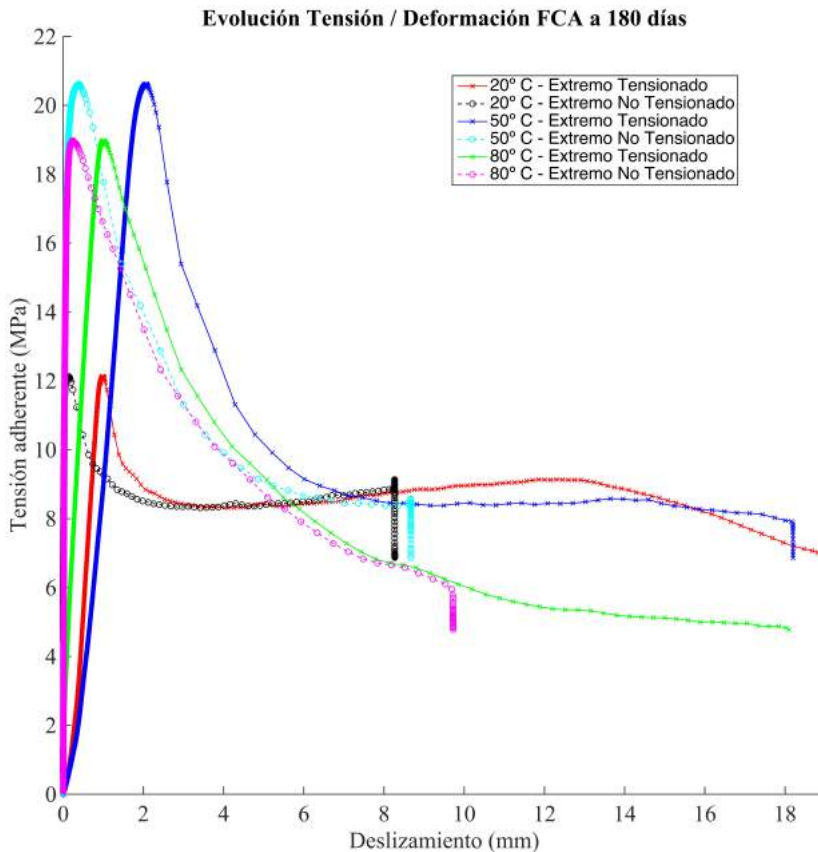


Fig. 4.20.- Gráfica de comportamiento adherente de las barras de CFRP Arenadas en ensayo pullout a 180 días, con temperaturas de 20, 50 y 80 °C.



Tal como se ha expuesto, la resistencia a compresión del hormigón puede ser la responsable de ello, pues junto a la resistencia de la resina en la interfaz, son los principales factores que condicionan la tensión adherente; pero cabe destacar que las barras de CFRP arenadas se han comportado adecuadamente, contribuyendo a aumentar la tensión adherente final, movilizand o en mayor medida la adherencia por rozamiento.

El modo de rotura de la adherencia habitual de este tipo de barras se refleja en la Fig. 4.21, en la que se puede observar el desprendimiento total del recubrimiento de arena de sílice responsable de la adherencia por rozamiento, que es el mecanismo principal movilizad o por este tipo de barras. Cuando falla la adhesión del recubrimiento con el núcleo de la barra, se produce el fallo de adherencia de manera brusca y total.



Fig. 4.21.- Modo de rotura de las barras de CFRP Arenadas en ensayo de pullout, por desprendimiento completo del recubrimiento de arena de sílice del núcleo de la barra.



Cuando se produce la rotura de la adherencia, se comprueba que la barra aparece el núcleo de la barra totalmente a la vista, quedando el recubrimiento adherido al hormigón (Fig. 4.21). Este modo de rotura, y las tensiones que se generan en el proceso, hace que sean las zonas más cercanas a la superficie de la barra las más dañadas, como se puede observar en las imágenes obtenidas por el microscopio electrónico de barrido SEM (Fig. 4.22).

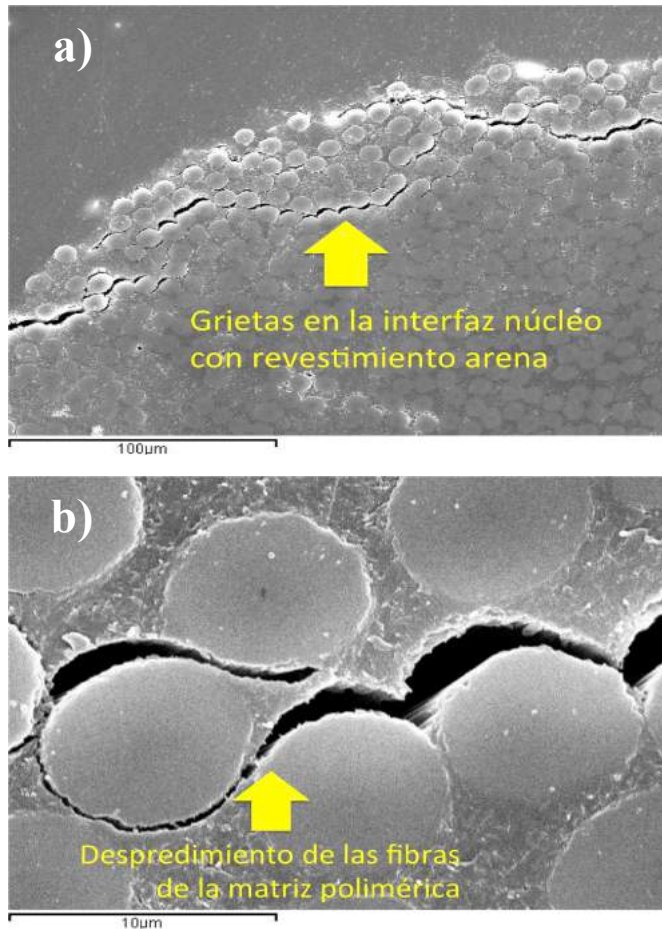


Fig. 4.22.- Imágenes SEM. a) Grietas producidas por el esfuerzo axial inducido en la barra de CFRP Arenada durante el ensayo de pullout en la interfaz, b) Detalle de la grieta producida, con la separación de las fibras de carbono respecto a la matriz polimérica.

Respecto al deterioro que sufre la resina polimérica al someterla durante 180 días a 80 °C, se muestra en la Fig. 4.23 el severo deterioro que sufre la matriz de resina polimérica en estas condiciones.

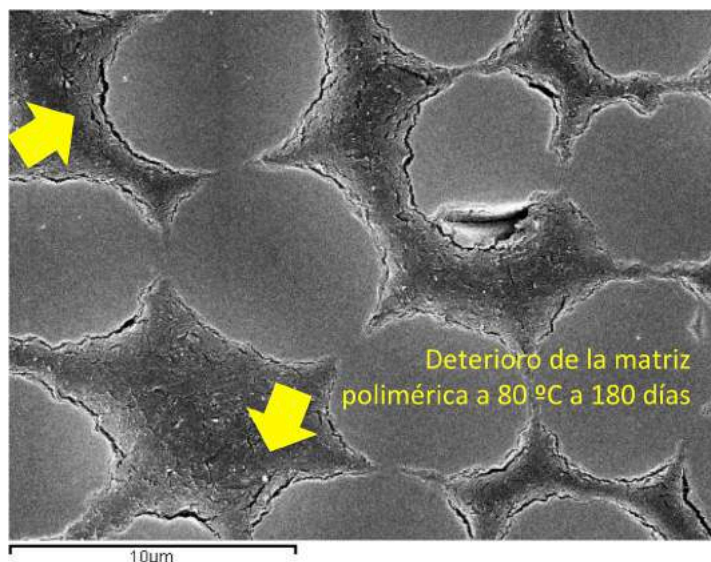


Fig. 4.23.- Deterioro de la resina polimérica en zona de interfaz debida a la acción de la temperatura de 80 °C durante 180 días, con pérdida de adherencia a fibras y fisuración generalizada en las zonas sin fibras.

Aun con ello, como se ha mostrado, las tensiones adherentes máximas se incrementan con la edad, lo que implica dos cosas: En primer lugar, que este deterioro y fisuración de la matriz polimérica afecta más severamente a la interfaz que al núcleo de la barra, no afectando al interior de la barra de manera acusada, y sin condicionar, por tanto, la evolución de las resistencias a la temperatura máxima de esta investigación. Y, en segundo lugar, que la causa de ese aumento de tensión adherente puede ser debido al significativo incremento de la resistencia a compresión del hormigón, que confiere una resistencia en la geometría superficial de la barra que contrarresta los daños que producen las elevadas temperaturas, combinado con un curado

completo de la resina de la matriz polimérica de la barra, producido por el efecto del calor continuado.

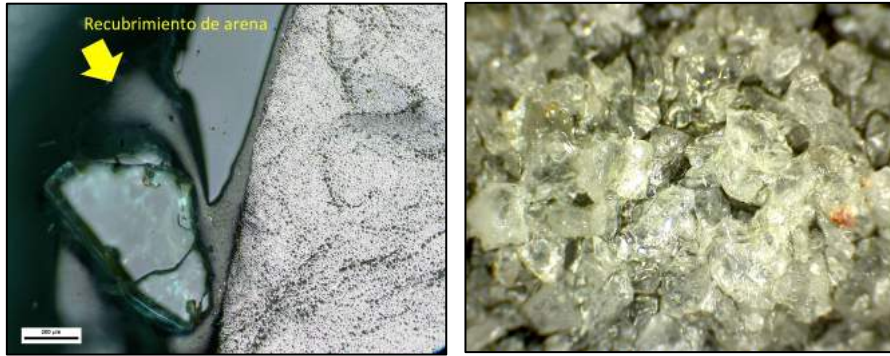


Fig. 4.24. Recubrimiento de arena de sílice que forma la geometría superficial que garantiza la adherencia de la barra al hormigón.

La Fig. 4.24 muestra el recubrimiento de arena, que ante un hormigón con gran resistencia a compresión, y por efecto de confinamiento, junto a la mayor resistencia de la resina al haber completado su curado, es capaz de desarrollar mayores tensiones adherentes a altas temperaturas en edades avanzadas que a menor temperatura y menor edad, activando para ello el mecanismo de adherencia por rozamiento de manera más significativa.

Con relación al modo en que se organiza la estructura interna de las fibras en el interior de las barras, se observa en las Fig. 4.25 y 4.26 que las fibras y la matriz polimérica no han sufrido ninguna reorganización interna por solicitaciones extremas, a diferencia de lo que se verá más adelante que sucede con las barras de CFRP Corrugadas, aunque sí presenta daños perceptibles en la matriz polimérica del núcleo (Fig. 4.27).

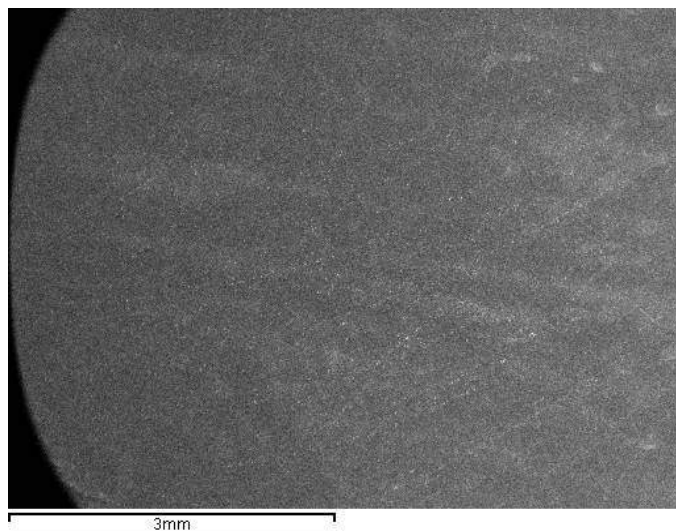


Fig. 4.25.- Imagen SEM x20 del núcleo de la barra CFRP Arenada al ser ensayada a pullout, sin daños en el núcleo.

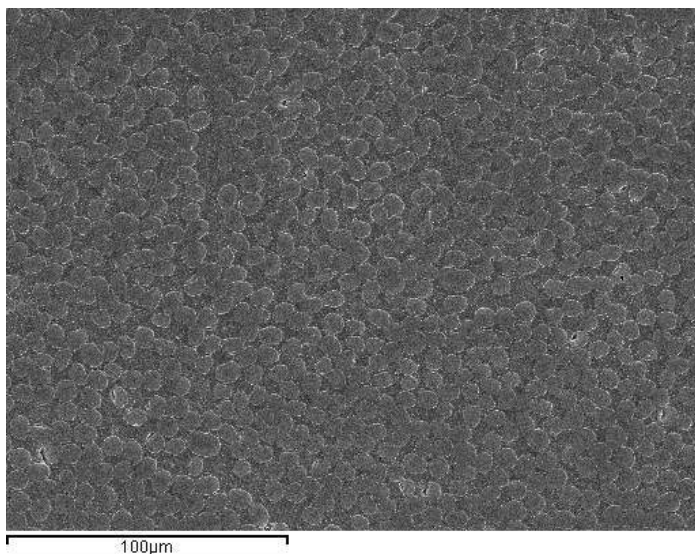


Fig. 4.26.- Imagen SEM x500 del núcleo de las barras de CFRP Arenadas que no presenta daños.

Será interesante observar cómo evolucionaría la resistencia adherente de las barras en caso de prolongar la edad en la que se

mantienen las condiciones de temperatura a 80 °C, y si este efecto, junto al deterioro generalizado de la resina de la matriz polimérica que sí comienza percibirse (Fig. 4.27), afectaría a la interfaz con el recubrimiento, provocando una disminución acusada de las tensiones adherentes máximas, así como una mayor rigidez y rotura frágil.

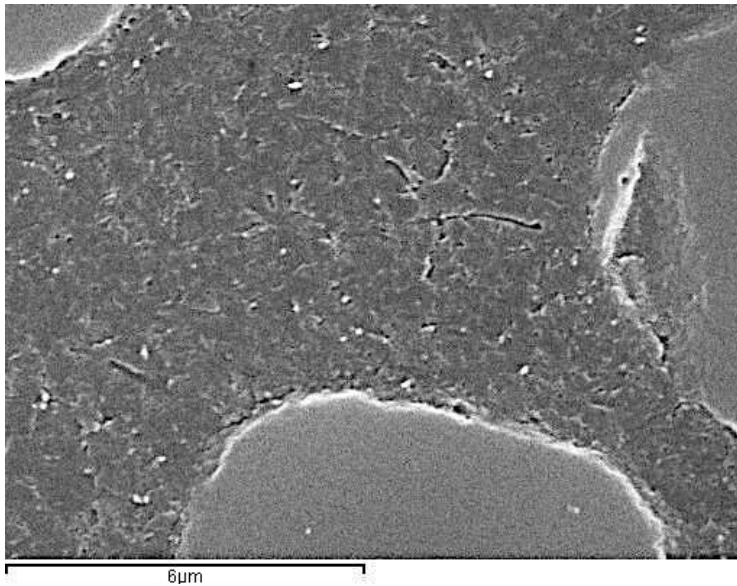


Fig. 4.27.- Imagen SEM x10000. Daños en la resina de la matriz polimérica en probeta FCA180/80A.

Como se observa en las Fig. 4.28 y 4.29, los daños en la interfaz entre el recubrimiento de arena y el núcleo son severos, más allá del arrancamiento de la geometría superficial. Es decir, la resina de la matriz polimérica, en las zonas próximas al recubrimiento arenado, está muy deteriorada a causa de las tensiones adherentes movilizadas para llegar a sus valores máximos. Estas imágenes constatan que el modo de rotura de la adherencia es muy frágil, lo cual es un aspecto a tener en cuenta en el caso de elementos estructurales.

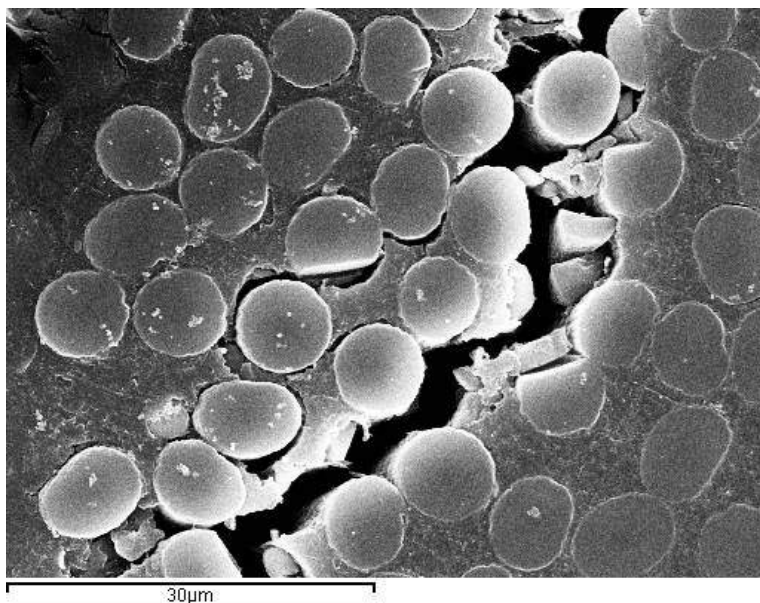


Fig. 4.28.- Imagen SEM x2000. Agrietamiento en interfaz núcleo y recubrimiento arenado de probeta FCA060/80A.

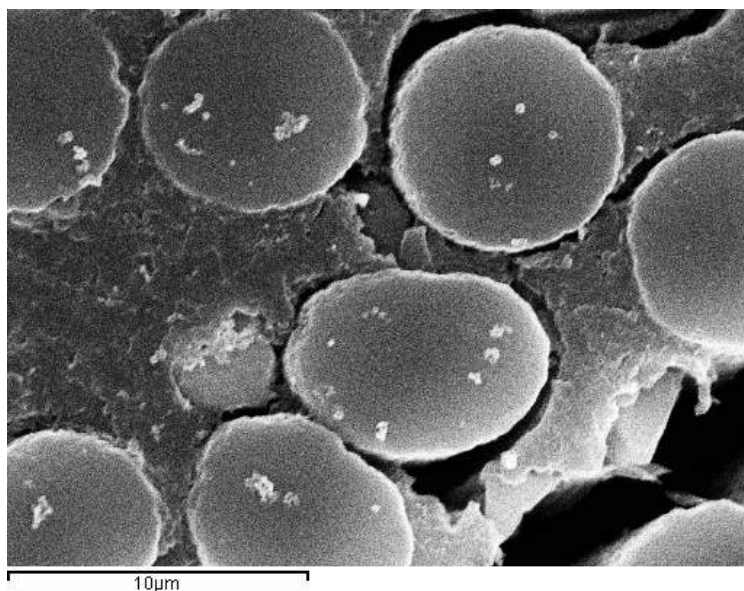


Fig. 4.29.- Imagen SEM x5000. Daños en resinas de matriz polimérica por agrietamiento y separación de fibras en interfaz de probeta FCA060/80A.



Por último, si se profundiza más en la estructura interna de la probeta mediante el ensayo de microscopía de fuerza atómica, se consigue percibir los daños que ha producido la acumulación de tensión en una resina de la matriz polimérica en la interfaz de la barra. De los resultados del ensayo AFM, realizados sobre esa zona de interfaz, para observar lo ocurrido tras el desprendimiento de la capa arenada del núcleo, se observa, en las Fig. 4.30 y 4.31, unas zonas más oscuras que representan aquellas áreas de la resina que han sido más severamente dañadas, mientras que en color claro aparecen las fibras, representando el daño que han soportado al desaparecer entre ellas la resina y el colapso que se ha producido.

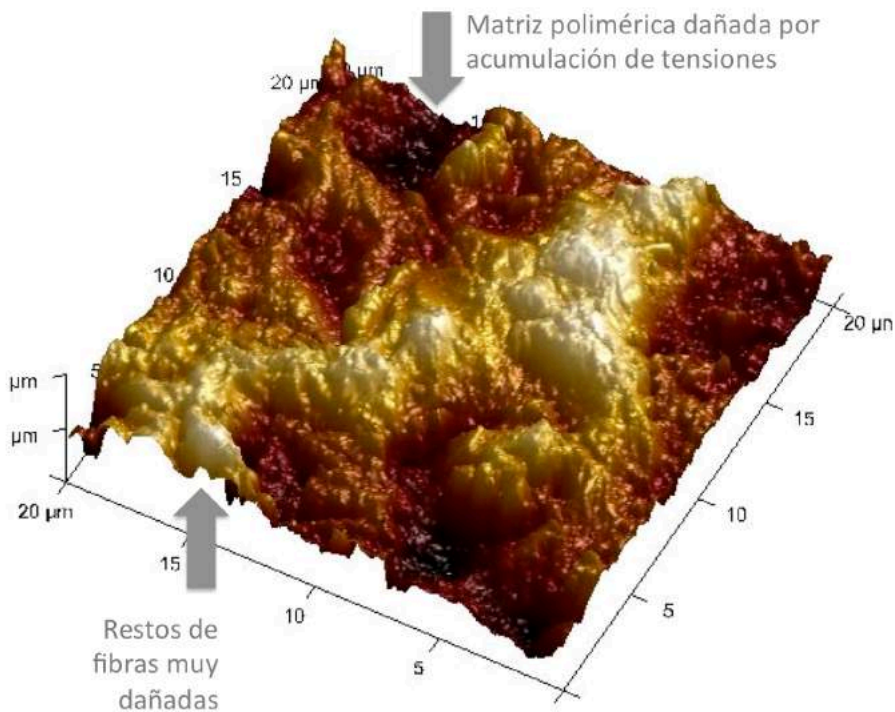


Fig. 4.30.- Imagen AFM de la Probeta FCA180/80A. (1/2)

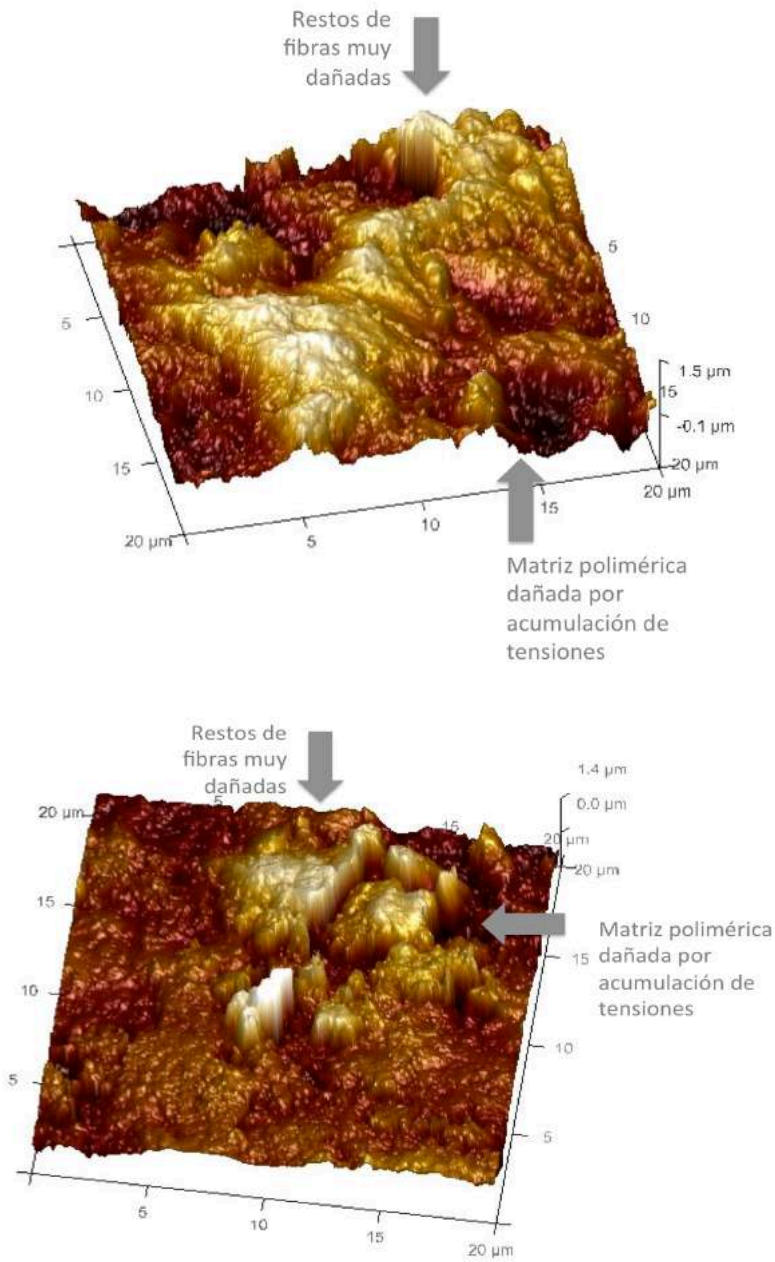


Fig. 4.31.- Imágenes AFM de la Probeta FCA180/80A. (2/2)



Una vez analizados los resultados de los ensayos practicados a las barras de CFRP Arenadas podemos concluir que la resina de la matriz polimérica de la zona del núcleo no ha sido severamente dañada a la temperatura de 80 °C en edades menores 60 días, mientras que se comienzan percibir daños destacables a 180 días y 80 °C.

Asimismo, la resina que forma la interfaz sí que muestra daños por altas temperaturas. En edades superiores a los 28 días, esos daños que afectarían a la adherencia por rozamiento, una vez superada la fase de adhesión química, se ven compensados por el curado completo de la resina de la matriz polimérica y el aumento de resistencia a compresión del hormigón, por lo que, como se ha mostrado en las gráficas, no se desarrollan tensiones de adherencia muy superiores, pero tampoco menores, ante altas temperaturas en los rangos estudiados en esta investigación.

4.1.3 Influencia de altas temperaturas en barras de CFRP  
Corrugadas

Las barras de CFRP Corrugadas tienen un mecanismo principal de adherencia que semeja al de las barras de acero, mediante acuañamiento mecánico. Por ello, será muy interesante el contraste de cómo se comportan comparativamente.

Para iniciar el análisis de los resultados, se muestran las gráficas de tensiones adherentes normalizada y máxima, según los criterios expuestos para las otras tipologías de barras, organizados, en primer lugar, por temperatura y estudiando su evolución a las diferentes edades del estudio.

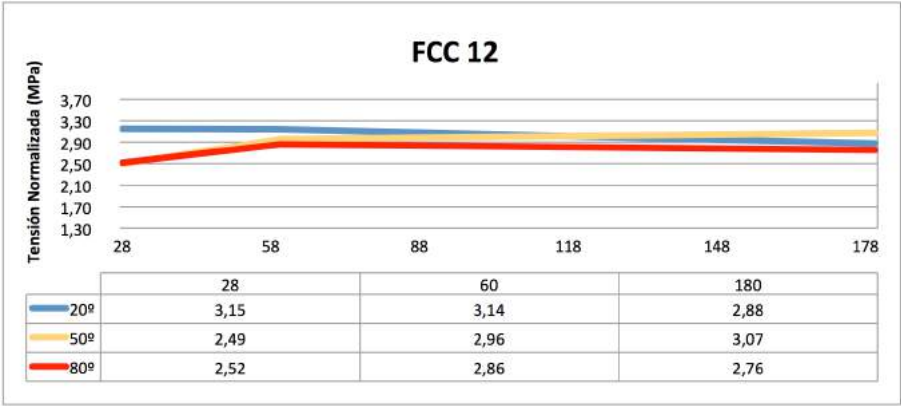


Fig. 4.32.- Gráfica de valores medios de tensión normalizada de las probetas con barras de CFRP corrugadas d12 (FCC) ensayadas a Pullout, organizada por Temperatura y en función de las edades estudiadas en esta investigación.

En la Fig. 4.32 se observa una evolución mínima de las tensiones adherentes normalizadas. Como se ha comentado reiteradamente, ante diferencias tan acusadas de resistencia a compresión del hormigón, entendemos que la normalización pudiera no recoger totalmente el fenómeno adherente real en su conjunto.

La tensión adherente normalizada está entre 2,52 MPa y 3,15 MPa, con poca evolución entre diferentes condiciones climáticas. Para determinar con mayor claridad la tendencia evolutiva de las tensiones, se propone la Fig. 4.33 con tensión adherente máxima.

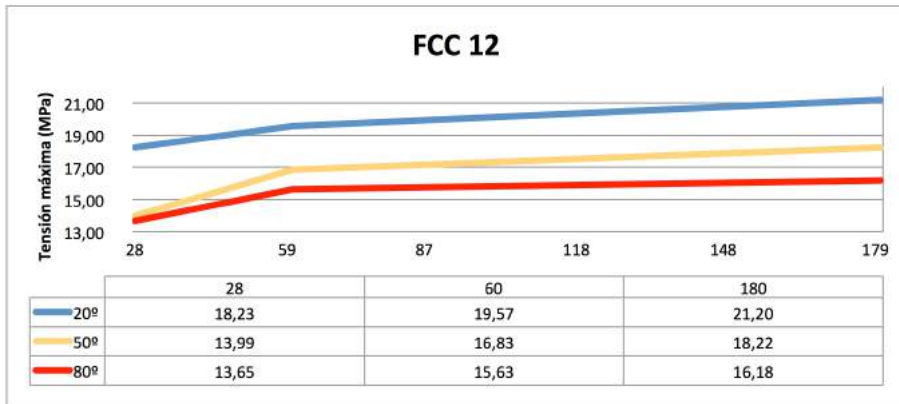


Fig. 4.33.- Gráfica de valores medios de tensión máxima de las probetas con barras de CFRP corrugadas d12 (FCC) ensayadas a Pullout, organizada por Temperatura y en función de las edades estudiadas en esta investigación.

Se aprecia en la Fig. 4.33 como, en todas las temperaturas estudiadas, a mayor edad, mayor tensión adherente máxima se ha desarrollado en las probetas. Consideramos que esta tendencia es interesante, más allá de que el dato, como se ha mencionado, no esté normalizado.

Se observa una mayor pendiente de crecimiento de tensiones adherentes a 20 y 50 que a 80 °C, lo cual es un indicativo de lo que puede estar sucediendo.

El rango de tensión adherente máxima que presentan las probetas es de 13,65 MPa a 21,20 MPa. Si se analiza detenidamente esta serie de datos, se observa que para una misma edad de ensayo, decrece al incrementar la temperatura.

Para profundizar en el análisis, se proponen las gráficas de tensión adherente normalizada y máxima, respectivamente, ordenadas

por edad, y en función de las temperaturas de ensayo (Fig. 4.34 y 4.35). De este modo se puede observar cómo influye la temperatura soportada por las probetas durante el mismo período de tiempo.

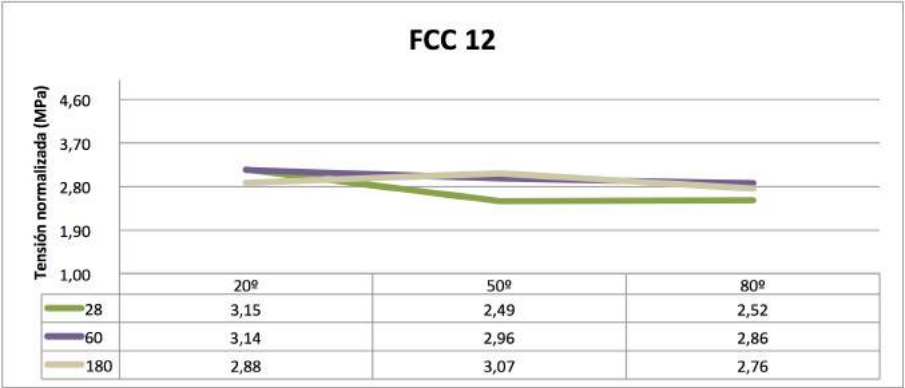


Fig. 4.34.- Gráfica de valores medios de tensión adherente normalizada de las probetas con barras de CFRP Corrugadas d12 (FCC) ensayadas a pullout, organizada por Edad y en función de las temperaturas estudiadas en esta investigación.

En la Fig. 4.34 ya se puede percibir como a mayor temperatura, menor tensión adherente normalizada, aunque mínimamente, como tendencia general; en la Fig. 4.35 ya se aprecia nítidamente esta tendencia.

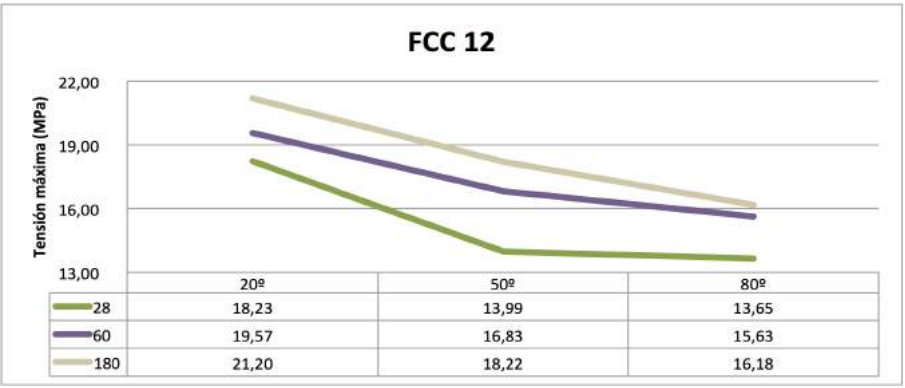


Fig. 4.35.- Gráfica de valores medios de tensión adherente máxima de las probetas con barras de CFRP Corrugadas d12 (FCC) ensayadas a pullout, organizada por Edad y en función de las temperaturas estudiadas en esta investigación.

En esta tipología de barras, a diferencia de las barras de acero y las de CFRP arenadas, sí que hay una relación directa entre altas temperaturas y disminución de la tensión adherente.

A 28 días, se obtienen datos de tensión adherente de 18,23 MPa a 20 °C cayendo hasta 13,65 MPa a 80 °C, lo que supone un descenso del 25,12%. A 60 días, los datos son de 19,57 MPa a 20 °C hasta los 15,63 MPa a 80 °C, una disminución del 20,13 %. Por último, a 180 días, los datos varían desde los 21,20 MPa a 20 °C hasta los 16,18 MPa a 80 °C, lo que supone una disminución en la tensión adherente máxima del 23,68%.

Es decir, que en todas las edades de estudio, a mayor temperatura se ha obtenido menor tensión adherente.

Es importante precisar que, estas probetas, al igual de las de barras de acero, también estuvieron todo el tiempo de la investigación en la cámara de curado a fin de determinar la incidencia de la saturación de humedad, esto es, la presencia de agua. Pero, a diferencia de lo ocurrido con las probetas con barras de CFRP Arenadas, en la barras de CFRP Corrugadas no se percibe elemento distorsionador alguno debido a este motivo.

Como se apuntó en el apartado 4.1.1, la humedad afecta considerablemente a las resinas de Viniléster (Parkyn, 1985), que también son el componente de la matriz polimérica de estas barras corrugadas. Pero la diferencia se basa en la capa superficial de las barras de CFRP Corrugadas, que en contraposición al recubrimiento de arena de sílice con base de resina polimérica, es menos permeable. Este hecho, junto al esencial, que es el mecanismo de adherencia por anclaje mecánico en las barras corrugadas, hace que la humedad superficial de la barra no haya afectado a la adherencia.

De igual modo, se podría concluir que tampoco afecta a la composición de las corrugas, pues de otro modo el comportamiento a 20 °C habría sido muy distinto. Como se verá a continuación, la forma

en que la geometría superficial de las barras de CFRP corrugadas ha respondido a cada temperatura no ha sido afectado por el estado de humedad de la superficie de las barras, manteniéndose constante.

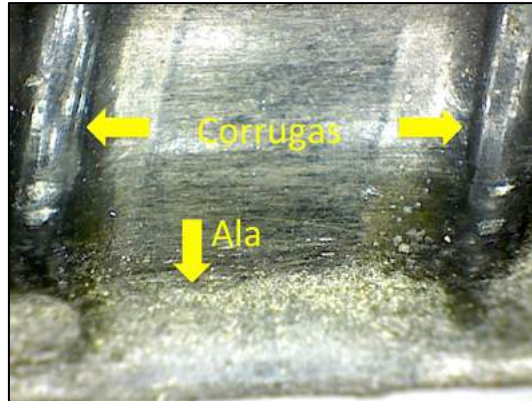


Fig. 4.36.- Imagen microscopio digital de barra de CFRP corrugada d12, con detalle de las corrugas y el ala.

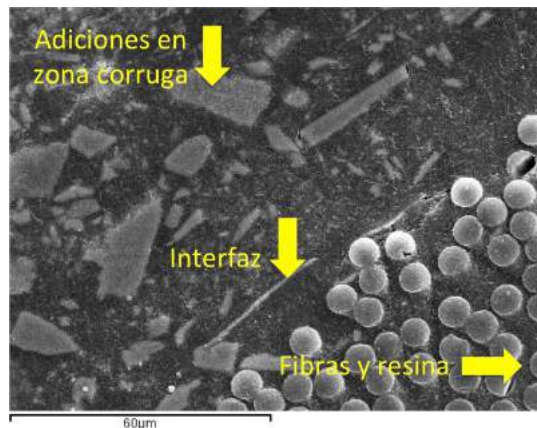


Fig. 4.37.- Imagen SEM x1000 de la corruga de barra de CFRP Corrugadas d12.

Se observa en la Fig. 4.36 y 4.37 la geometría de las barras de CFRP Corrugadas para garantizar el anclaje mecánico, y la diferente composición de la corruga.

Para determinar en qué porcentaje se produce la adhesión química inicial y el anclaje mecánico, se presenta la Fig. 4.38.

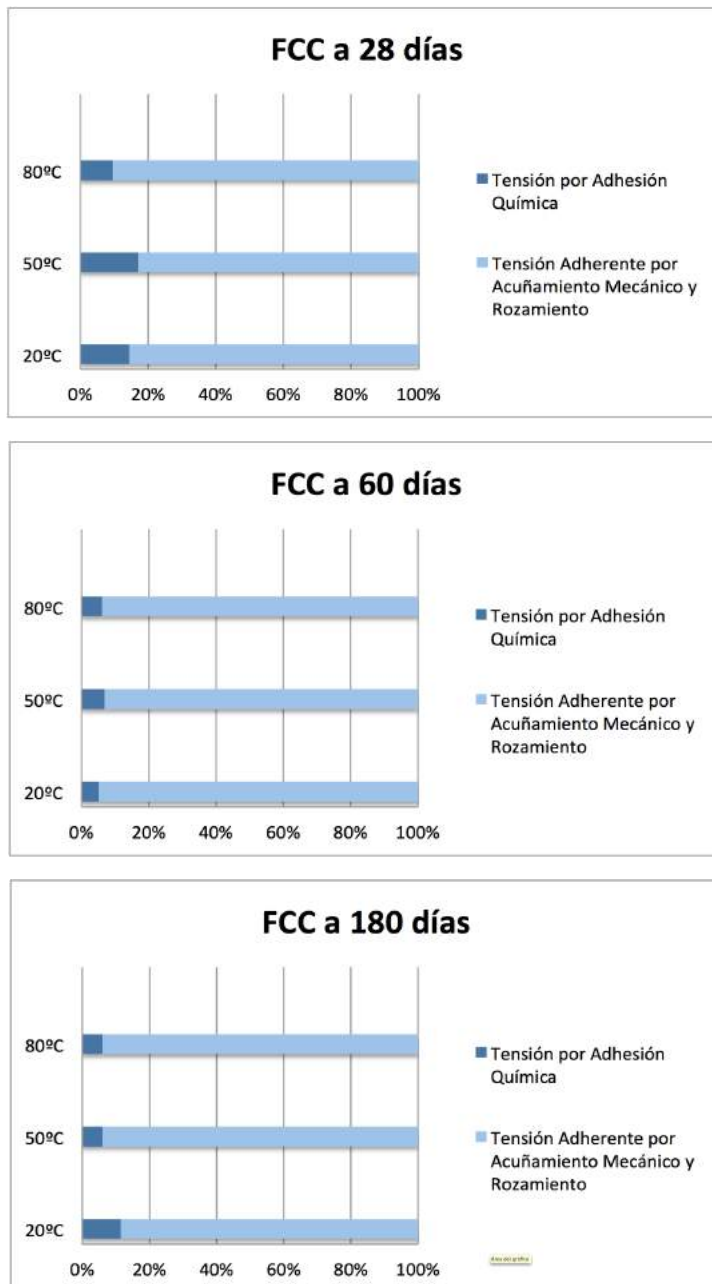


Fig. 4.38.- Gráficas de porcentajes apilados para barras de CFRP Corrugadas d12, por tipo de adherencia movilizada en los ensayos de pullout.

Según se previó en el estado del arte, la adherencia química en este tipo de barras es muy bajo, en un rango de un 3,80% a 18,20%, no teniendo un papel importante en los mecanismos del adherencia de las barras, siendo el anclaje mecánico el responsable de adquirir tensión de adherencia relevante.

Este hecho favorecerá la reducción de la rigidez de las barras, como se observa en las gráficas de tensión / deformación siguientes (Fig. 4.39).

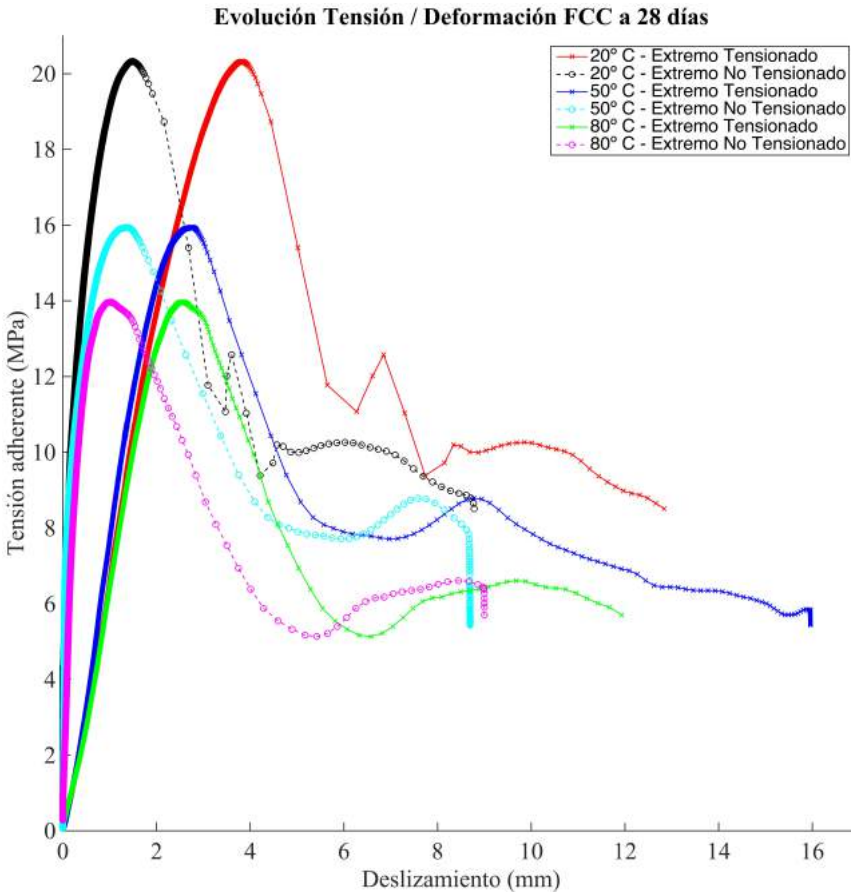


Fig. 4.39.- Gráfica de comportamiento adherente de las barras de CFRP Corrugadas en ensayo pullout a 28 días, con temperaturas de 20, 50 y 80 °C.



Se observa una pendiente menor que en las barras de CFRP arenadas, así como una mayor área de tensión-deslizamiento tras alcanzar la tensión máxima. Se constata que para esta edad de 28 días, las tensiones son mayores a menor temperatura.

Lo mismo sucede a 60 y a 180 días. Conviene detenerse en la gráfica de la máxima duración de los ensayos de esta investigación para comprobar que se siguen ordenando las tensiones de manera inversamente proporcional a la temperatura (Fig. 4.40).

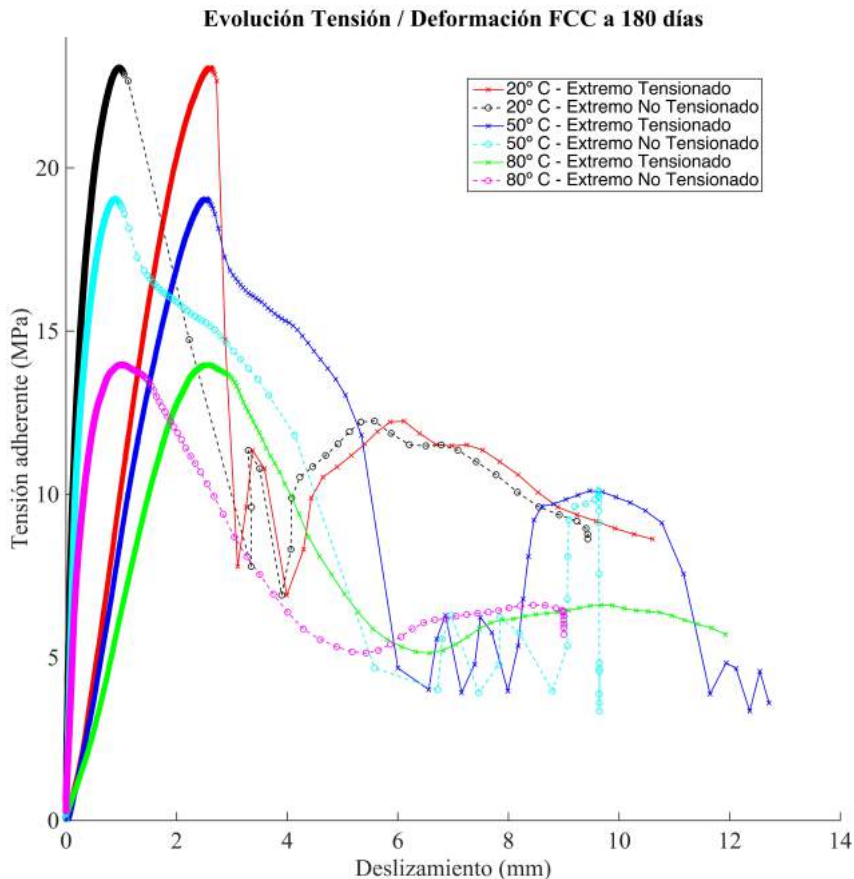


Fig. 4.40.- Gráfica de comportamiento adherente de las barras de CFRP Corrugadas en ensayo pullout a 180 días, con temperaturas de 20, 50 y 80 °C.

Los resultados obtenidos en valores medios de tensión adherente máxima han sido a 20 °C de 18,23 MPa a 21,20 MPa, a 50 °C de 13,99 MPa a 18,22 MPa, y a 80 °C de 13,65 MPa a 16,18 °C.

Según se refleja en la Tabla 3.11, el modo de rotura de las probetas de CFRP Corrugadas en ensayo pullout es por corte de las corrugas (RA) o por rotura combinada (RC) del hormigón circundante a las corrugas y de algunas corrugas.

Como se observa en la tabla 3.11 y se refleja en la Fig. 4.41, la rotura combinada sólo ha aparecido en casos de 20 °C y a 28 días. Es decir, que guarda relación con la temperatura y con la resistencia a compresión del hormigón.



Fig. 4.41.- Imágenes tomadas a la longitud adherente de la probeta FCC028/20B tras el ensayo de pullout, donde se observan corrugas conservadas, seccionadas y semi arrancadas.

Por el contrario, la rotura más generalizada en esta investigación ha sido la provocada por el seccionamiento completo de las corrugas en las zona de la longitud adherente de la barra.

Es preciso analizar el por qué de este fenómeno, en qué se basa y de qué modo está afectado por altas temperaturas.

En la Fig. 4.42 se presenta un estudio de imágenes obtenidas con los diferentes ensayos realizados en la que se presenta el seccionamiento de las corrugas al llegar a tensión adherente máxima a edades superiores a 28 días, siendo total en las probetas de cualquier edad a 50 y 80 °C.

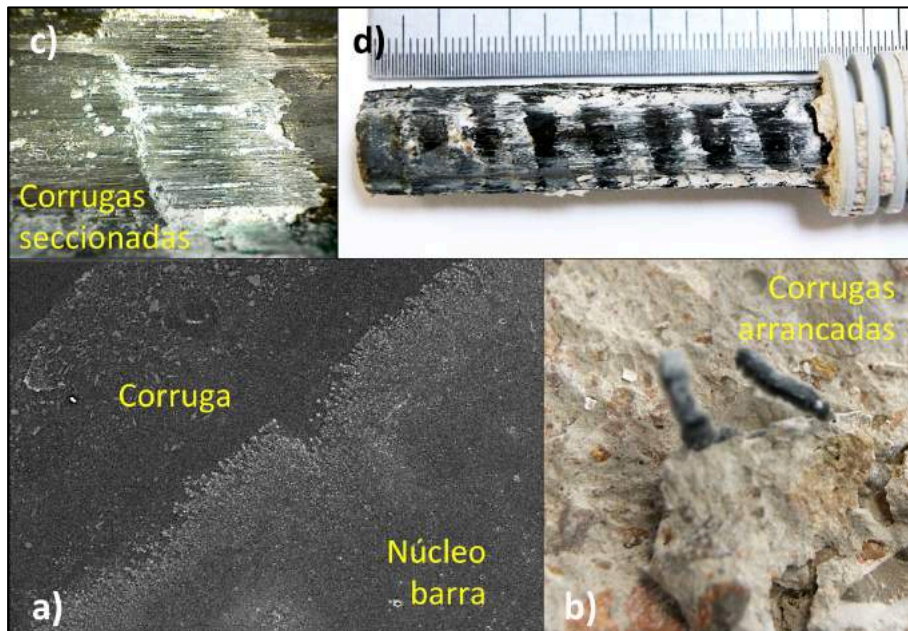


Fig. 4.42.- Montaje de imágenes de barra de CFRP corrugadas. a) Imagen SEM de interfaz corruga/núcleo, b) Resto de corrugas adheridas al hormigón, una vez han sido arrancadas en pullout, c) Imagen microscopio digital de barra tras arrancamiento de corruga por pullout, y d) Longitud adherente de barra con total seccionamiento de las corrugas.

La composición de las corrugas es a base de resinas de viniléster y unas adiciones al 15% de compuestos de SiCa y SiAl, cuya misión es aumentar el módulo elástico, permitiendo el anclaje más efectivo al hormigón y la resistencia adherente.

El efecto de las altas temperaturas inciden, como se ha visto, en la viscosidad de la matriz polimérica, y esto, ante tensiones más elevadas, condiciona la adherencia máxima final.

Será en la interfaz de la corruga con el núcleo donde las altas temperaturas inducirán comportamientos diferentes en los elementos que conforman la geometría superficial, pues además de la influencia citada en la resina de la matriz, al tener diferentes coeficientes de dilatación las fibras, las adiciones y la resina, se puede acelerar la desunión interna del composite.

Como se aprecia en las figuras siguientes, el deterioro de la resina no se limita al exterior de la barra sino que afecta severamente al núcleo de la barra (Fig. 4.43 y 4.44).

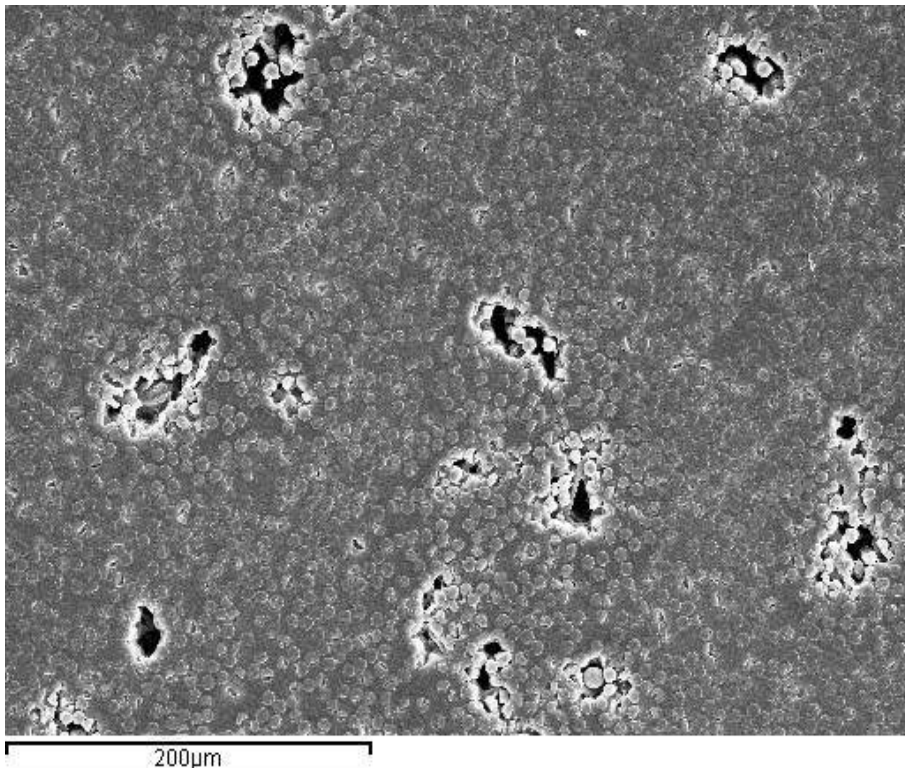


Fig. 4.43.- Imagen SEM x250 de l núcleo de la barra de la probeta FCC180/80B, con daños generalizados en la resina.

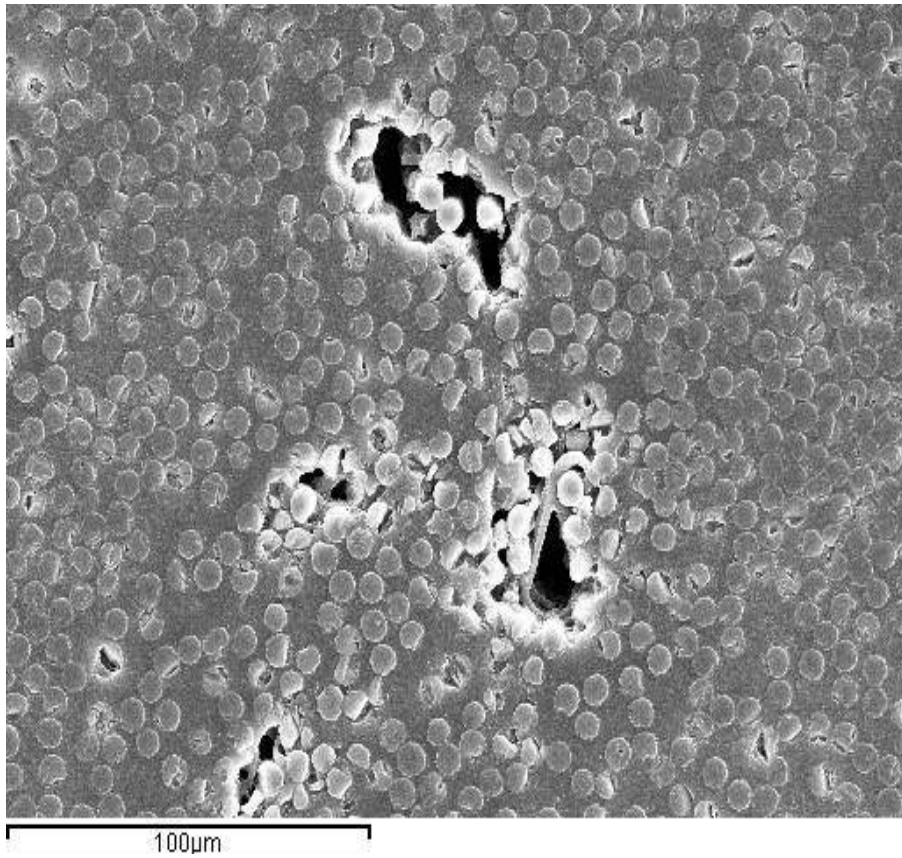


Fig. 4.44.- Imagen SEM x500 del núcleo de la barra de la probeta FCC180/80B, con daños severos en la resina.

Si se aplica más aumento al microscopio, se puede comprobar como el deterioro de la resina, combinado con los esfuerzos axiales que ha sufrido la barra ha supuesto que, al perder cohesión con la matriz polimérica, se produzcan graves daños en las fibras y de manera generalizada (Fig. 4.45)



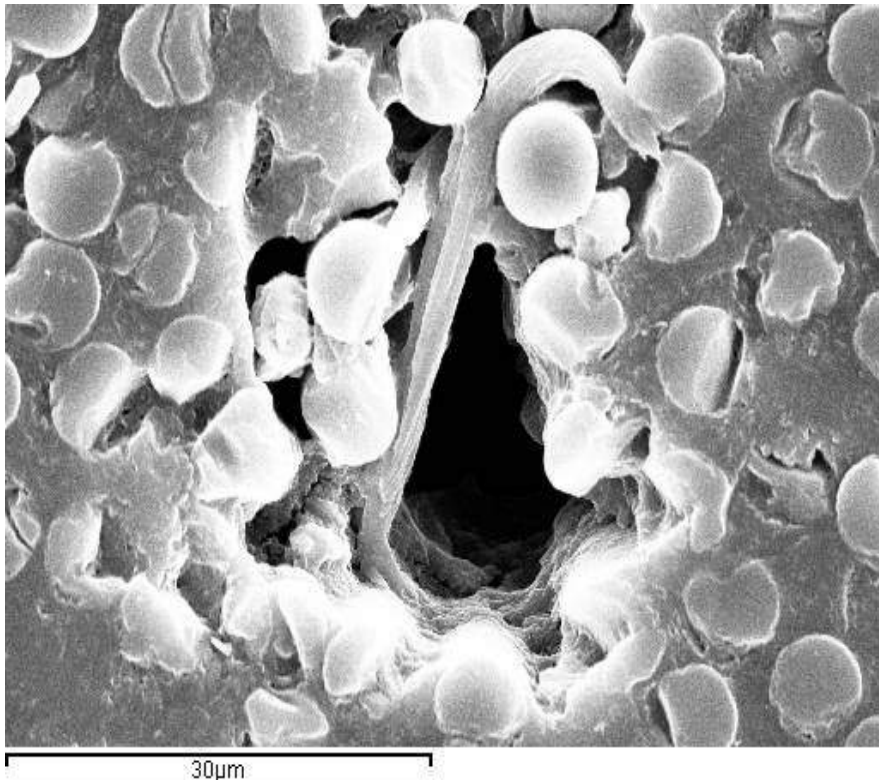


Fig. 4.45.- Imagen SEM x2000 del núcleo de la barra de la probeta FCC180/80B, con daños severos en la resina.

Si se observa la barra con menos aproximación, se percibe la causa de estos daños en el interior del núcleo (Fig. 4.46)

Estos daños se deben al modo en que se organiza la estructura interna de las fibras en el interior de las barras; como se observa en la Fig. 4.46, se produce un alineamiento en forma de cruz, lo que conlleva el movimiento de las fibras en el interior de la matriz polimérica, provocando una desconexión total de fibras con matriz polimérica y la rotura de muchas de ellas debido al reparto interno de las cargas axiales inducidas por el anclaje mecánico mediante las corrugas al hormigón, solicitando a tracción a la barra, lo que provoca el colapso de las fibras en algunas zonas (Fig. 4.47).

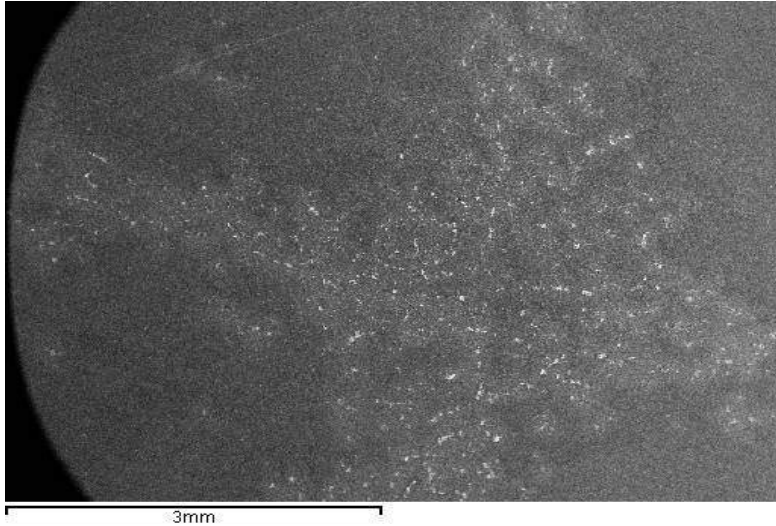


Fig. 4.46.- Imagen SEM de organización interna de las fibras del núcleo de la barra CFRP Corrugada al ser ensayada a pullout, exigiéndole a las fibras por transmisión desde interfaz de corrugas ancladas al hormigón.

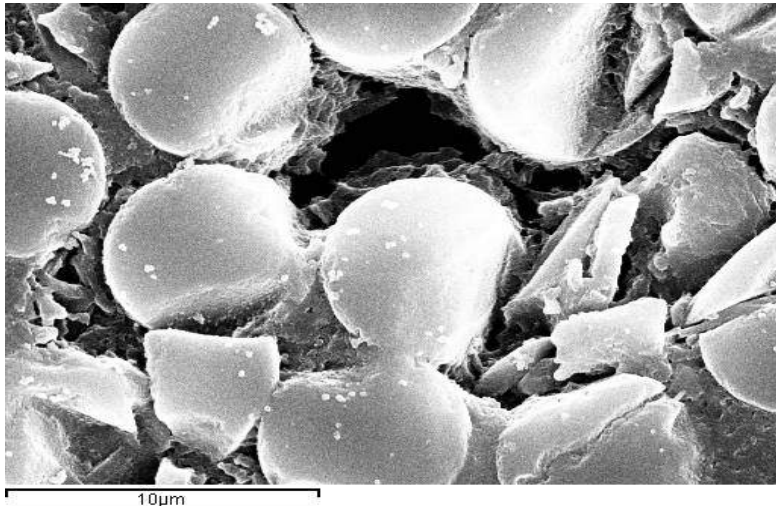


Fig. 4.47.- Imagen SEM de colapso de las fibras en el núcleo de las barra de la probeta FCC060/50C de CFRP Corrugadas debido a la alineación de las cargas y el deterioro de la resina de la matriz polimérica.

Al igual que en el caso de las barras de CFRP Arenadas, se analiza ahora el resultado del ensayo de microscopía de fuerza atómica realizado a una probeta de CFRP Corrugada en condiciones de 180 días y 80 °C para observar la topografía de la superficie de una sección transversal de la barra y las consecuencias de las condiciones climáticas y los esfuerzos movilizados durante el ensayo de pullout. En las Fig. 4.48 y 4.49 se observa la diferente coloración que las imágenes de AFM muestran, apreciando en color claro las fibras de carbono, y en color más oscuro y rojizo la matriz polimérica deteriorada.

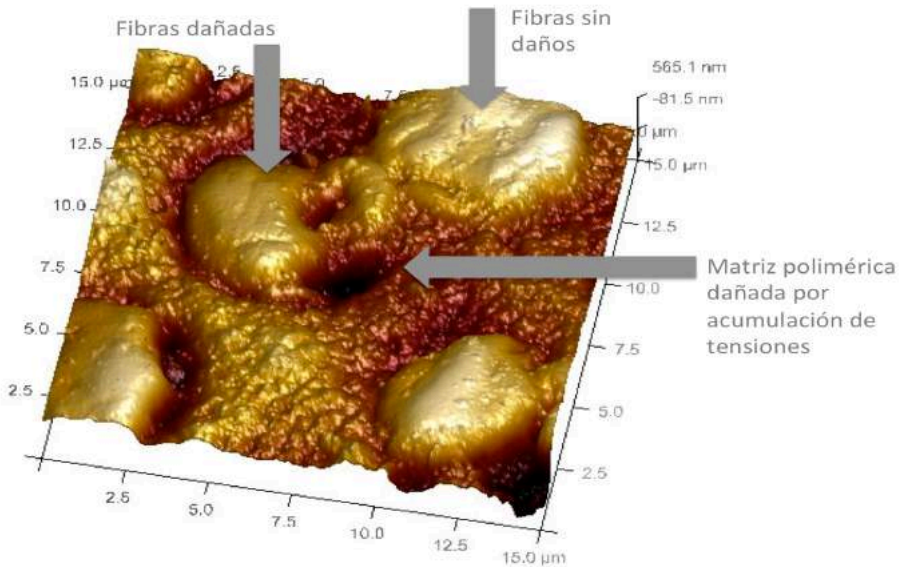


Fig. 4.48.- Imagen AFM de probeta FCC180/80C.



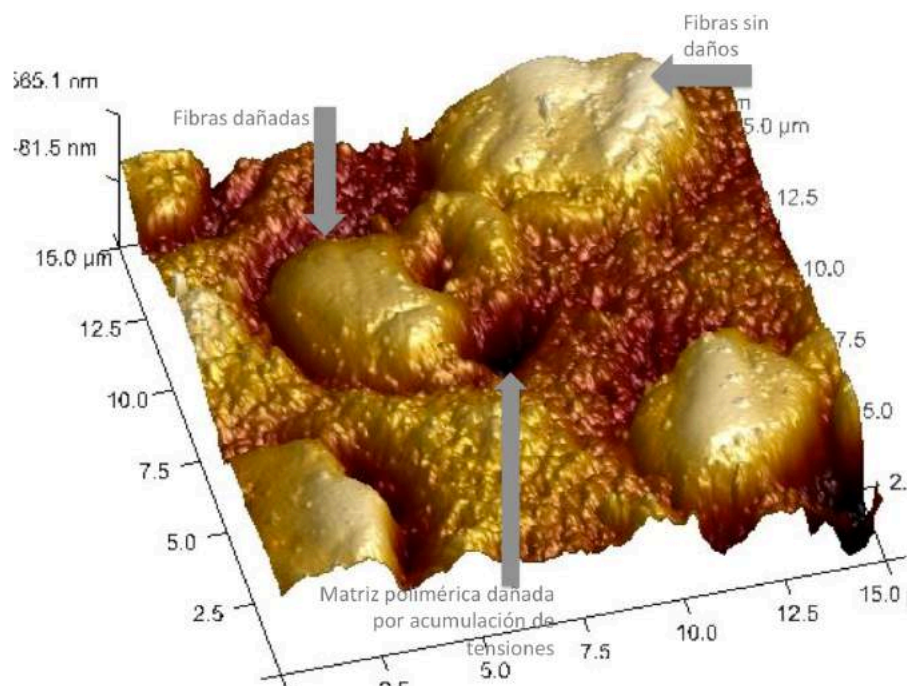


Fig. 4.49- Imagen AFM de probeta FCC180/80C.

#### 4.1.4 Comparativa de influencia de altas temperaturas entre los diferentes acabados (barras de CFRP arenadas, CFRP corrugadas y de Acero)

Una vez analizado el comportamiento de las barras de CFRP según su tratamiento superficial se procede a establecer comparaciones entre ellas, completando el estudio comparando con las de acero, para terminar mostrando un resumen global que ayude a plantear de manera general el diferente comportamiento adherente de cada barra en relación con las demás.

##### *4.1.4.1. Comparativa barras de CFRP arenadas y corrugadas*

En la investigación se ha estudiado el comportamiento adherente de barras arenadas CFRP de diámetro 14 mm y barras corrugadas corrugadas de CFRP de diámetro d12. Se muestran seguidamente gráficas comparativas de tensión adherente máxima y deformación en extremo no tensionado.

Se ha decidido que únicamente se grafíe el extremo no tensionado para mejorar la legibilidad de las gráficas y por ser este deslizamiento el equivalente más fiel al ocurrido en el interior de la probeta. De este modo, se consigue una comparación más ajustada a la realidad de lo que ocurre en la superficie de contacto entre la barra y el hormigón.

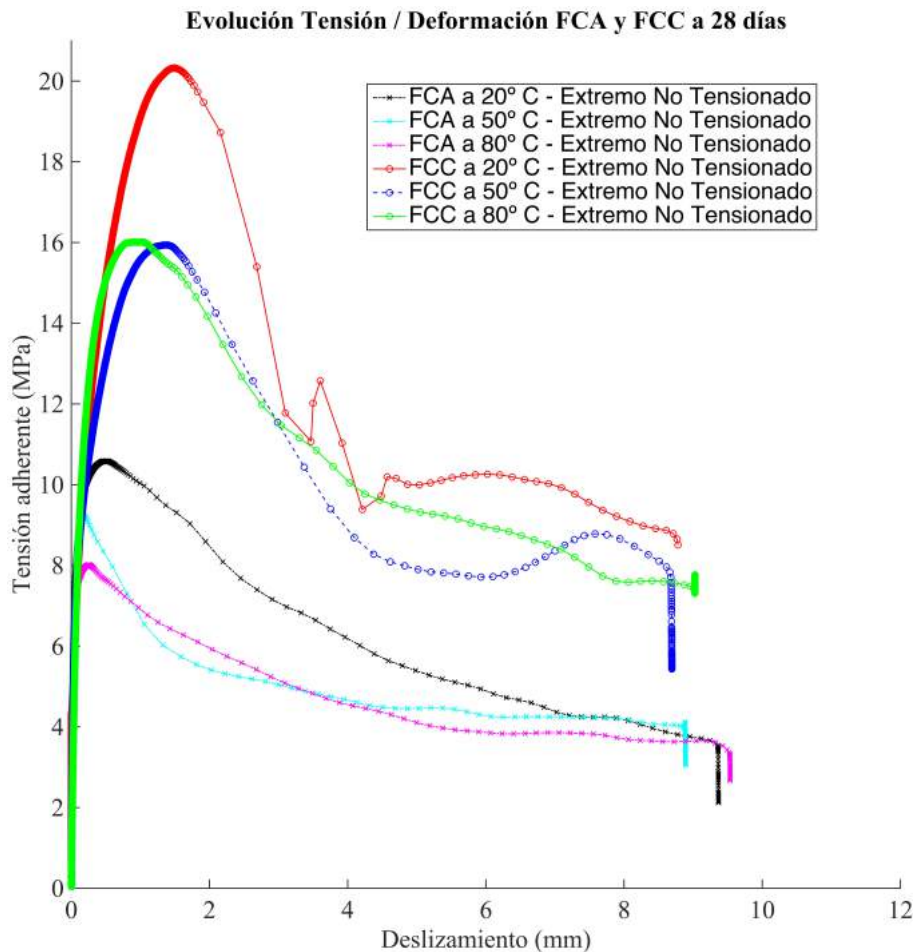
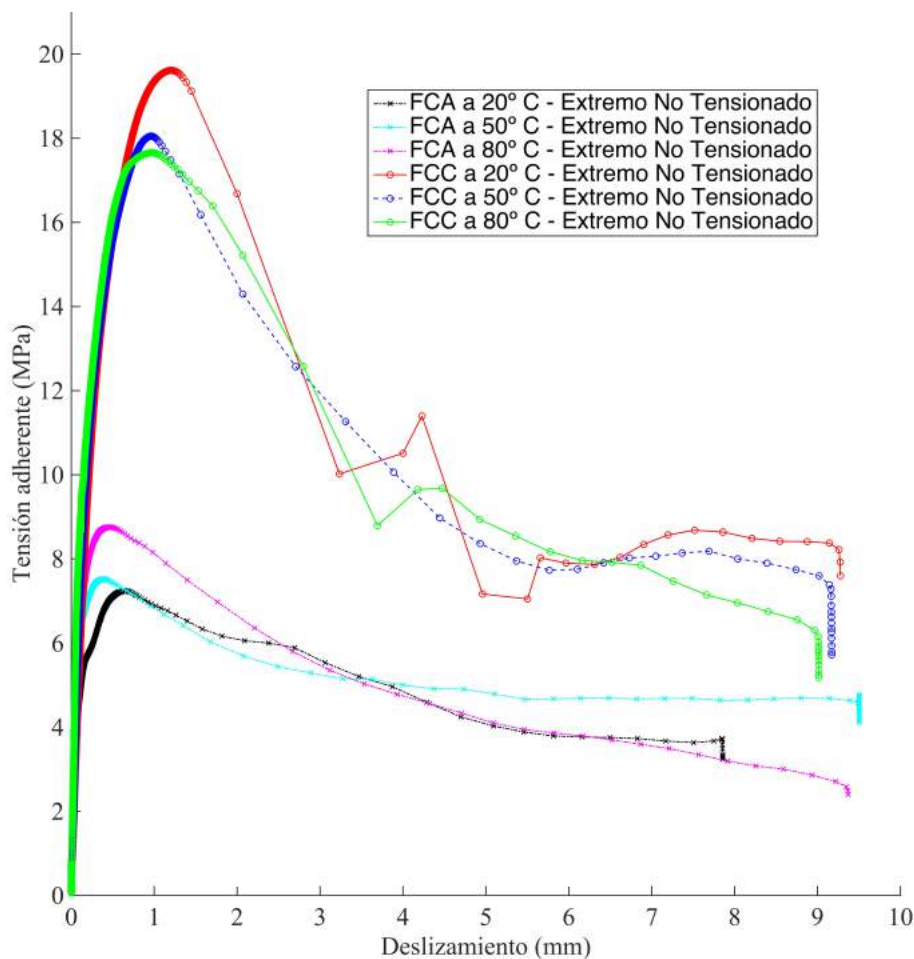


Fig. 4.50.- Gráfica comparativa evolución de las probetas FCC y FCA de tensión / Deformación del extremo no tensionado a 28 días y a 20, 50 y 80 °C.

En la Fig. 4.50 aparecen las gráficas de rotura pullout a 28 días, combinadas por cada barra y a las tres temperaturas de estudio.

Los resultado a 28 días nos muestran como las barras de CFRP Corrugadas adquieren una mayor tensión adherente en los tres rangos de temperaturas, estimando dicho incremento en un 47,06%.

**Evolución Tensión / Deformación FCA y FCC a 60 días**

En la Fig. 4.51 se observa, a 60 días, un comportamiento similar al dado a 28 días, es decir, una mayor tensión adherente en todos los rangos de temperatura en las barras de CFRP Corrugadas respecto de las Arenadas.

Se aprecia la diferencia en los resultados entre ambas tipologías de barras, estimando un incremento de las corrugadas del 57,89% en estas edades.

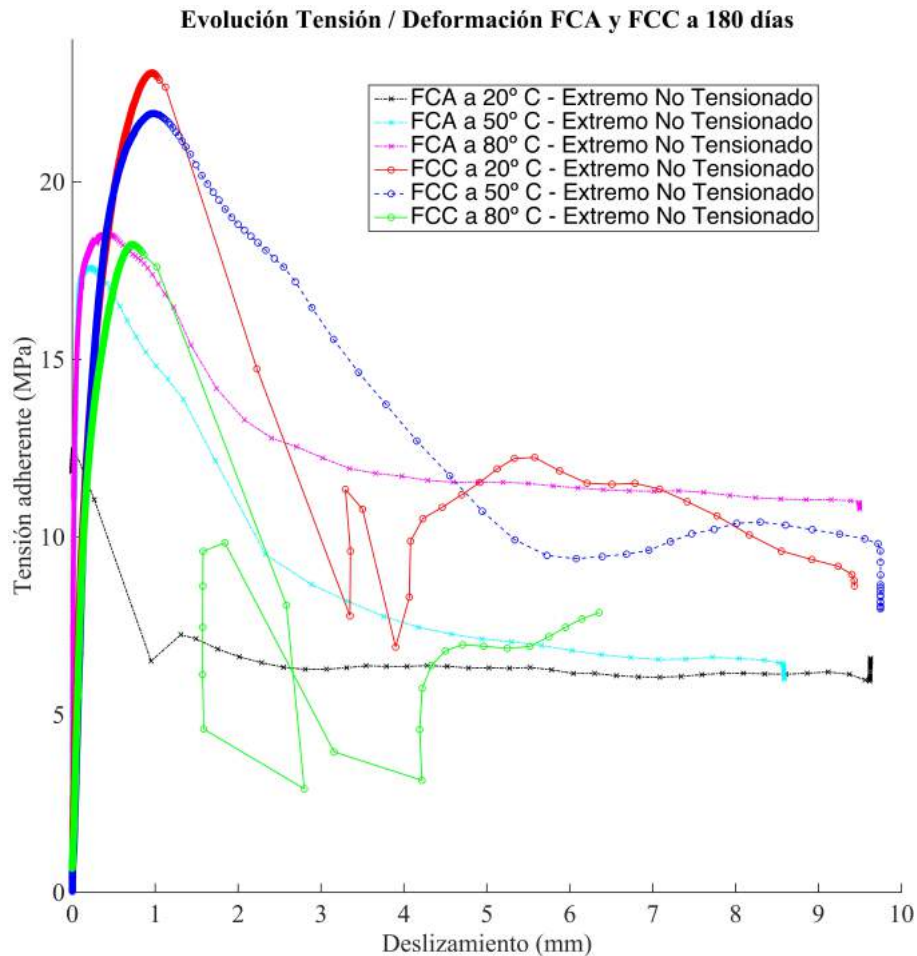


Fig. 4.52.- Gráfica comparativa evolución de las probetas FCC y FCA de tensión / Deformación del extremo no tensionado a 180 días y a 20, 50 y 80 °C.

A 180 días la situación varía. Como se ha visto en los puntos 4.1.1 y 4.1.2, la influencia de las altas temperaturas en cada tratamiento superficial es diferente. Así, mientras en las barra de

CFRP arenadas, el efecto de la temperatura se ha visto compensado con el aumento de resistencia a compresión del hormigón a largo plazo (180 días) y el completo curado de la resina de la matriz polimérica, pudiendo así mejorar la tensión adherente máxima, en el caso de las barras de CFRP corrugadas, el impacto de las temperaturas sobre la resina que forma, junto con las adicciones, las corrugas (máximas responsable del anclaje mecánico) ha sido muy acusado, disminuyendo sensiblemente la tensión final adherente.

Como se aprecia en la Fig. 4.52, en temperatura de 20 °C, la tensión adherente de las barras de CFRP corrugadas es mayor a las de CFRP arenadas en un 45,65%. Es decir, a 180 días sigue el comportamiento observado a 28 y 60 días respecto.

Pero a 50 °C comienza a recuperar tensión la barra de CFRP arenada frente a la de CFRP corrugada, estimado su diferencia en 19,71%.

Esta diferencia de tendencia se constata a los 80 °C, cuando las barras de CFRP arenadas superan en adherencia a las corrugadas en un 12,14%.

Estos resultados son consecuencia de lo expuesto en los apartados 4.1.1 y 4.1.2, en los que se citan los puntos críticos de cada tipología de barra., así como la influencia que la elevadas temperaturas tendrán la larga duración sobre el hormigón.

Los datos aportados en el apartado 3.6.1 acerca de la resistencia a compresión del hormigón a las diferentes edades y temperaturas del estudio condicionan los resultados de adherencia a esas edades avanzadas, por lo que, a modo de resumen, se muestran los comportamientos de las fibras de ambas barras a nivel interno, en función de los esfuerzos a los que han sido sometidos.

La forma en que las barras de CFRP corrugadas movilizan su adherencia principal, siendo mediante anclaje mecánico de las

corrugas con el hormigón, provoca una exigencia importante a tracción de las fibras del núcleo (Fig. 4.53). Esto es muy positivo en condiciones térmicas medias, pues una de las principales características de las fibras de carbono es su excelente comportamiento a tracción.

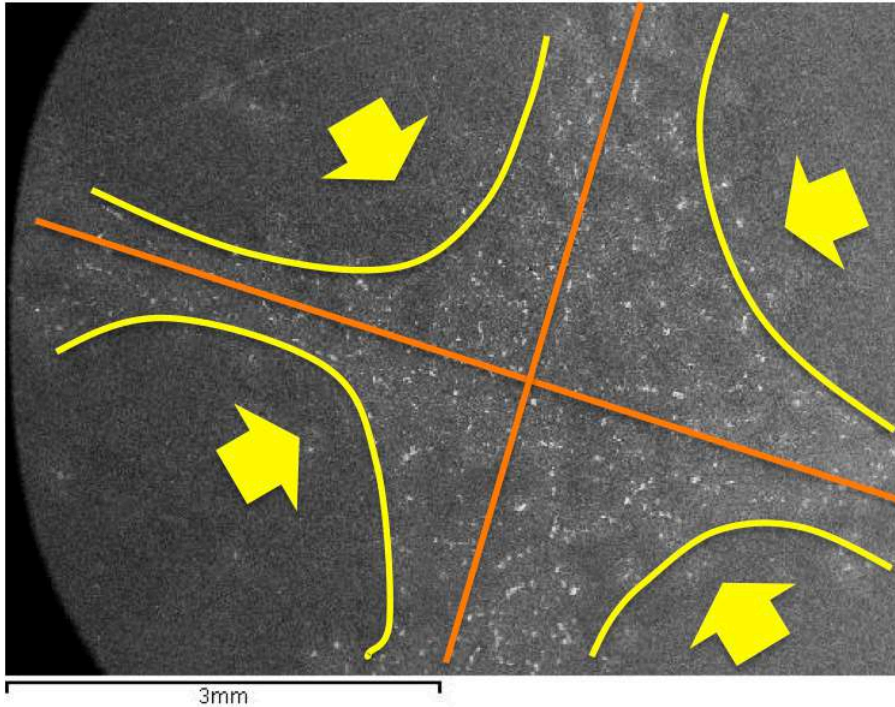


Fig. 4.53.- Concentración de los esfuerzos axiales en las fibras del núcleo de la barra de CFRP Corrugada.

El problema viene cuando se eleva la temperatura y esta afecta a la resina de viniléster en el núcleo y en la formación de las corrugas, hecho que condiciona la necesaria adhesión fibra/matriz polimérica, comenzando deterioros como los desarrollados en el apartado 4.1.2,



que terminan influyendo en menores tensiones adherentes a altas temperaturas.

En cambio, en la Fig. 4.54 se muestra el comportamiento mecánico en la superficie de la barra al solicitarla en ensayo pullout. Como se aprecia, se induce un esfuerzo de cizallamiento en la interfaz de la barra, lo que provoca el colapso frágil de la adherencia. Pero este efecto, según se ha expuesto en el apartado 4.1.1, se ve compensado con la resistencia a compresión del hormigón. Si esta es muy elevada, la presión por confinamiento desarrollada sobre la interfaz de la barra permite un crecimiento de las tensiones de adherencia al mejorar el rozamiento.

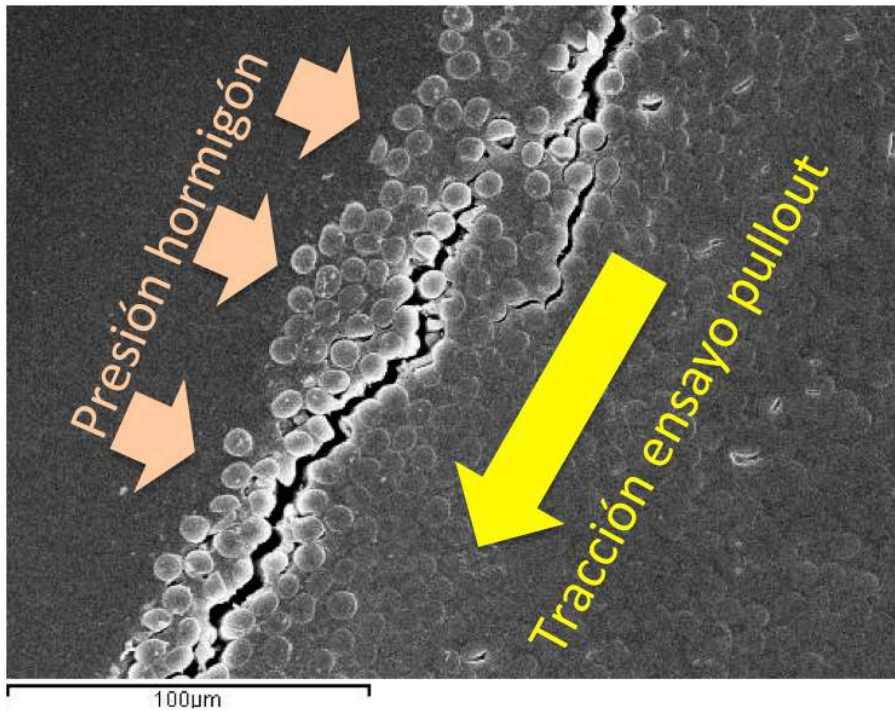


Fig. 4.54.- Efecto cortante producido en la interfaz del recubrimiento de arena con el núcleo de la barra de CFRP Arenada.



Esta es la situación a 180 días, es decir, elevadas resistencia a compresión respecto a las de 28 días, y por este motivo, junto a al mencionado curado completo de la resina, se superan las tensiones adherentes a mayor edad.

Los efectos sobre ambas texturas están influenciados por la resistencia a compresión, pero en mayor medida favoreciendo al desarrollo de tensión adherente máxima en las barras de CFRP Arenadas.

#### *4.1.4.2. Comparativa del comportamiento adherente entre las barras de acero con las de barras de CFRP Arenadas y Corrugadas*

Una vez comparado el comportamiento adherente de las diferentes barras de CFRP, se procederá a comparar con las barras de acero.

En las gráficas siguientes se presentan ordenados los resultados de tensión adherente máxima por edades, en función cada tipo de barra y temperaturas. A 28 días, la mayor resistencia obtenida tiende a ser la de las barras de CFRP corrugadas seguidas por las de acero y, finalmente, por las barras de CFRP arenadas. Asimismo, se muestra una tendencia descendente de tensión adherente con el aumento de las temperaturas (Fig. 4.55).

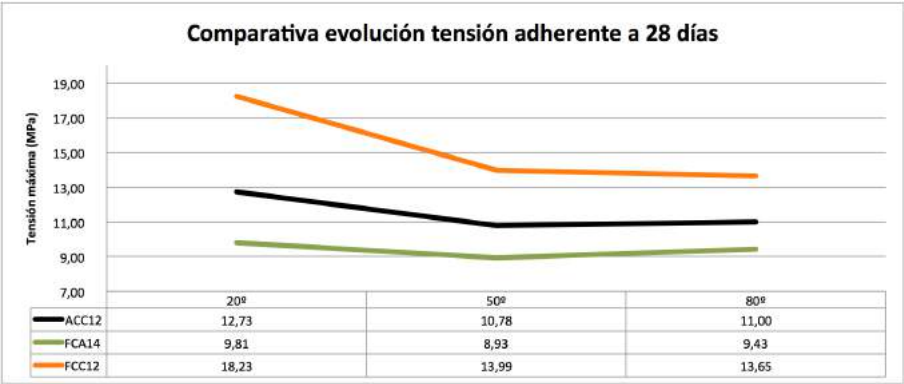


Fig. 4.55.- Tensión adherente máxima en ensayo de pullout a 28, por tipología de barra y temperaturas (20, 50 y 80 °C)

Como se observa en la tabla de la Fig. 4.55, a 20 °C la máxima tensión adherente es de 18,23 MPa, conseguida por la barras de CFRP corrugadas, frente a los 12,73 MPa de las barras de acero, lo que supone un incremento del 30,17%.

Si comparamos con lo ocurrido a 80 °C, se aprecia que las barras de CFRP corrugadas alcanza los 13,65 MPa, mientras las de acero consiguen 11,00 MPa, lo que reduce la diferencia a un 19,41%. Parece perceptible, por tanto, una mayor influencia de las altas temperaturas en la barras de CFRP corrugadas que en el acero a esta edad.

Las barras CFRP Arenadas son la que menor valor de tensión adherente presenta de los tres tipos de barras estudiados para la edad de 28, si bien cabe destacar la poca incidencia que las altas temperaturas tienen sobre ellas, algo que se analizará con más detalle en edades más avanzadas.

Analizando el siguiente tramo temporal, se presentan los resultados a 60 días en la Fig. 4.55. A 20 °C se observa como sigue la tendencia de que las barras de CFRP corrugadas sean las que más tensión adherente máxima consiguen, seguidas por las de acero y finalmente por la barras de CFRP arenadas. Las barras de CFRP

corrugadas alcanzan los 19,57 MPa frente a los 16,04 MPa de las de acero, un incremento del 18,04%. Es decir, que hasta los 60 días, la tendencia de resultados es homogénea, con más tensión adherente en las barras de CFRP corrugas que en el resto.

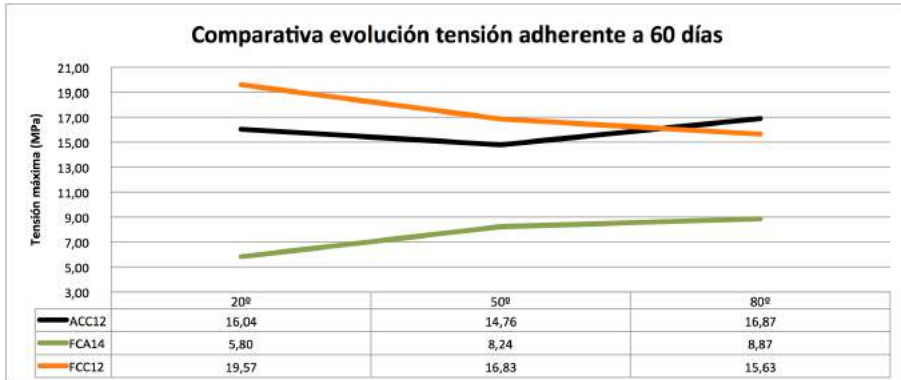


Fig. 4.56.- Tensión adherente máxima en ensayo de pullout a 60, por tipología de barra y temperaturas (20, 50 y 80 °C)

A partir de los 50 °C esa tendencia comienza a cambiar, percibiéndose una menor pendiente en la pérdida de adherencia en las barras de acero, aun cuando en esta temperatura aun serán las barras de CFRP Corrugadas las que alcancen 16,83 MPa frente a los 14,76 MPa de las de acero; es decir, un 12,30% más de adherencia.

Es a 80 °C y a 60 días cuando se comprueba que los daños internos en la resina de la matriz polimérica de la barra de CFRP corrugada siguen avanzando y sólo alcanza 15,63 MPa, frente a los 19,57 MPa alcanzados a 20 °C. Es decir, ha perdido un 20,13% de tensión adherente máxima.

En cambio, las probetas con barra de acero ha incrementado su tensión desde los 16,05 MPa hasta los 16,87 MPa, superando la tensión adherente de las barras de CFRP Corrugadas en este período y temperatura.

La barras de CFRP Arenadas mantienen una pendiente casi nula de 50 a 80 °C, con tensiones adherentes de 8,24 MPa y 8,87 MPa, respectivamente.

En el período más largo de esta investigación, seis meses, se pueden constatar esas tendencias, confirmando una prevalencia de las barras de acero sobre las de CFRP (Fig. 4.57).

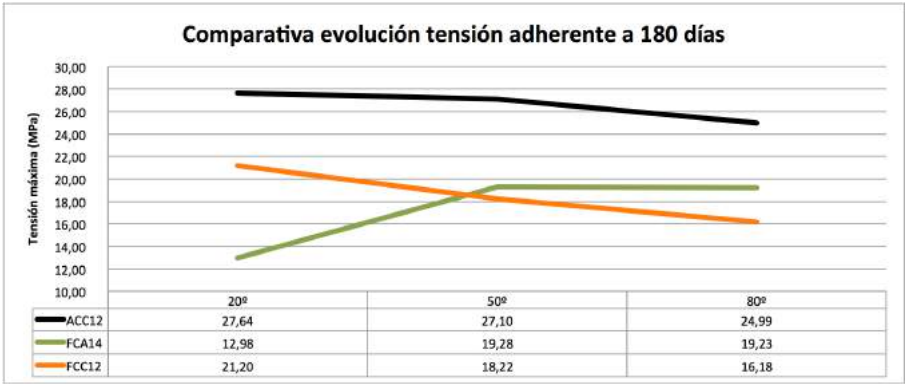


Fig. 4.57.- Tensión adherente máxima en ensayo de pullout a 180, por tipología de barra y temperaturas (20, 50 y 80 °C)

A 20 °C (recordemos que en condiciones del 95% de humedad) durante 180 días el hormigón de las probetas se ha desarrollado en un ambiente inmejorable, por lo que los resultados de los ensayos de resistencia a compresión del hormigón mostraron valores muy elevados, un 146 % sobre el ensayado a 28 días.

Con ello, el factor determinante para la adherencia ha sido el comportamiento de las resinas de viniléster de las barras de CFRP, en función del mecanismo de adherencia movilizado, sea por adhesión química y rozamiento (las arenadas) o por anclaje mecánico (las corrugadas). En función de ello, los daños han condicionado la tensiones adherentes finales.

Se observa, asimismo, que la pendiente de pérdida de tensión adherente de las barras de CFRP corrugadas respecto a las de acero es

más acusada. Pero esta disminución de tensión en las barras de acero indica que el hormigón, si bien ha incrementado su resistencia a compresión, ha acusado las altas temperaturas de 80 °C durante seis meses en la superficie de contacto barra/hormigón, afectando a su tensión adherente.

A 180 días, la pérdida de tensión adherente de las barras de CFRP corrugadas desde los 20 °C a 80 °C ha sido del 23,68%; siendo la pérdida de tensión adherente de las barras de acero del 9,58%.

Con relación a las barras de CFRP arenadas, significar que, despreciando el valor a 20 °C por el posible efecto que la saturación de humedad supuso en la tensión adherente (apartado 4.1.1 de esta tesis), tiene un comportamiento estable desde los 50 a los 80 °C, marcando una muy apreciable tensión adherente de 19,28 MPa y 19,27 MPa. Es decir, se puede concluir que las barras arenadas son inalterables a rangos de temperaturas de hasta 80 °C.

Se ha realizado el análisis sobre las tensiones adherentes máximas por los criterios expuestos con anterioridad en relación a la conveniencia de aplicar la normalización de manera lineal a las probetas cuando el incremento de resistencia a compresión del hormigón (valor este por cuya raíz cuadrada se divide la tensión máxima para la normalización) es tan elevado como en los rangos temporales estudiados en esta investigación.

De cualquier modo, y como resumen de estas tensiones adherentes normalizadas se presenta la Fig. 4.58 en la que se recogen todas la tipologías, edades y temperaturas en la que se aprecia que no hay un cambio de tendencia que pudiera cuestionar el argumento utilizado. Es interesante comprobar la evolución de cada tipología y como lo acontecido para cada edad, temperatura y humedad ha condicionado el desarrollo de la tensión adherente de cada barra.

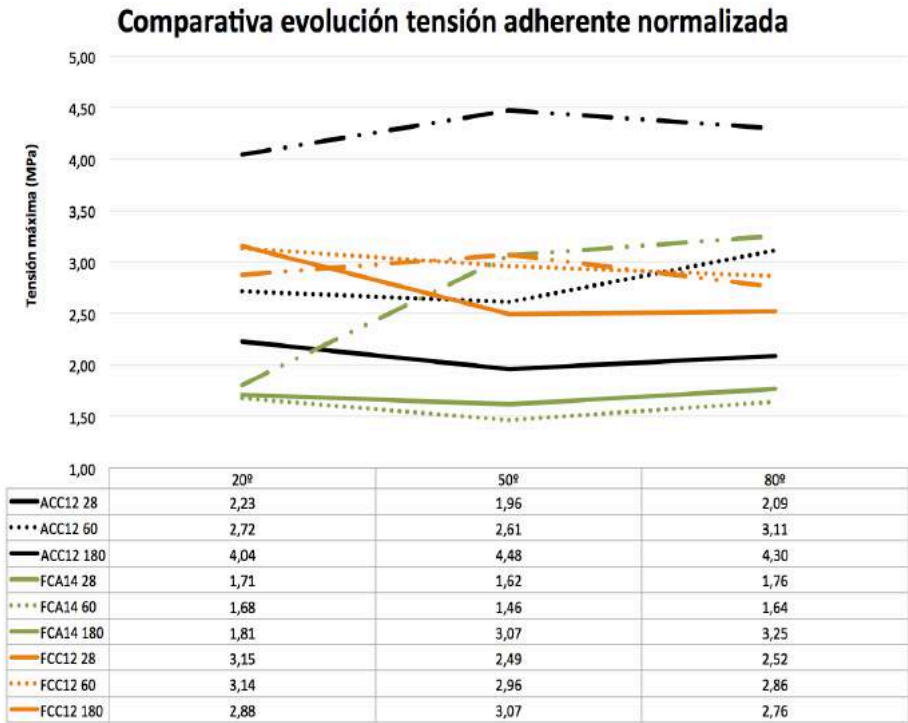


Fig. 4.58.- Gráfica comparativa de la tensión adherente normalizadas de todas las tipologías de barras, por edades y temperaturas.

Para completar la comparación de resultados entre las distintas tipologías de barras estudiadas en esta investigación, se analiza seguidamente el modo en que se produce la tensión respecto a la deformación recogida por el captador en el extremo no tensionado de la barra (Fig. 4.59).

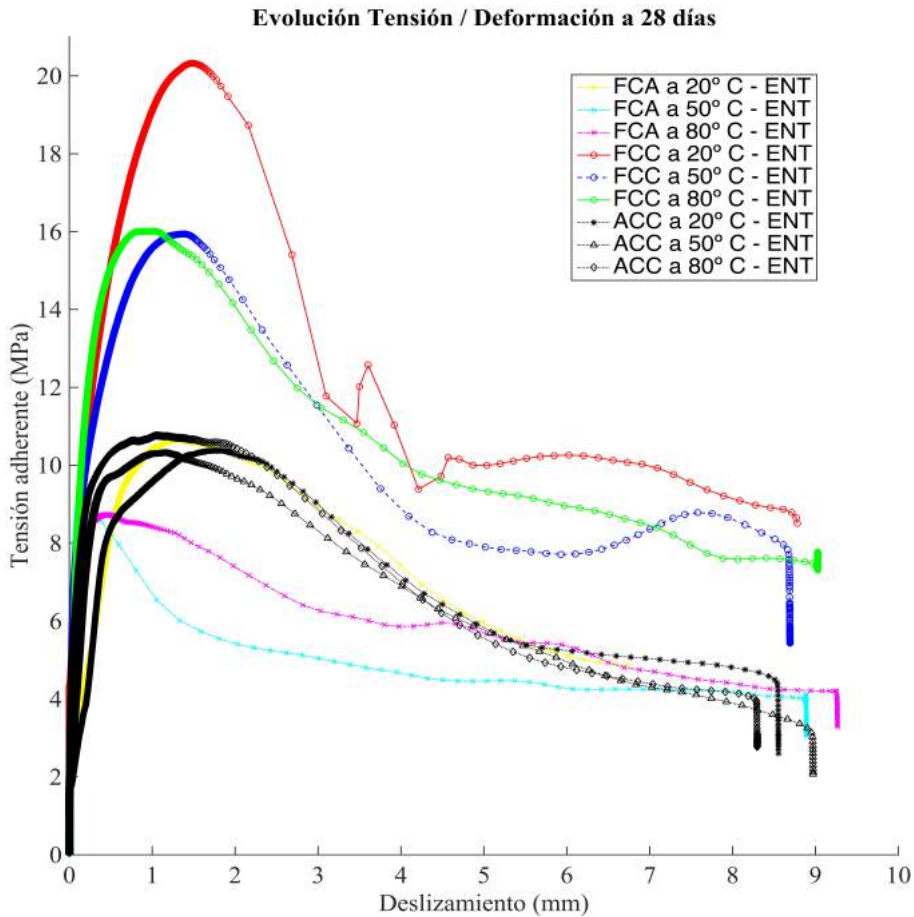


Fig. 4.59.- Gráfica combinada de las barras ACC, FCA y FCC ensayadas a 180 días, representadas por temperatura de 0, 50 y 80 °C, respectivamente.

Como se mostraba en la Fig. 4.55 (página 224), las gráficas de la Fig. 4.59 muestran como las barras de CFRP Corrugadas adquieren los valores más altos a esta edad de 28 días, con una pendiente tras llegar a valores máximos de tensión adherente similar a la de las barras de acero pero algo más acusada. Se observa como la temperatura afecta en mayor medida a los dos tipos de barras de CFRP, mientras que los valores en barras de acero se muestran sin apenas variación a las altas temperaturas.

En la Fig. 4.60 (página 225) se representan los resultados a 60 días. En ella se aprecia que, si bien las barras de CFRP corrugadas son las que más tensión adherente desarrollan, las de acero comienzan a aproximarse. Pero, a su vez, se observa como el comportamiento adherente de las barras de CFRP de se va distanciando entre 20, 50 y 80 °C, disminuyendo la tensión a mayor temperatura, tanto en la arenadas como en las corrugadas.

**Evolución Tensión / Deformación a 60 días**

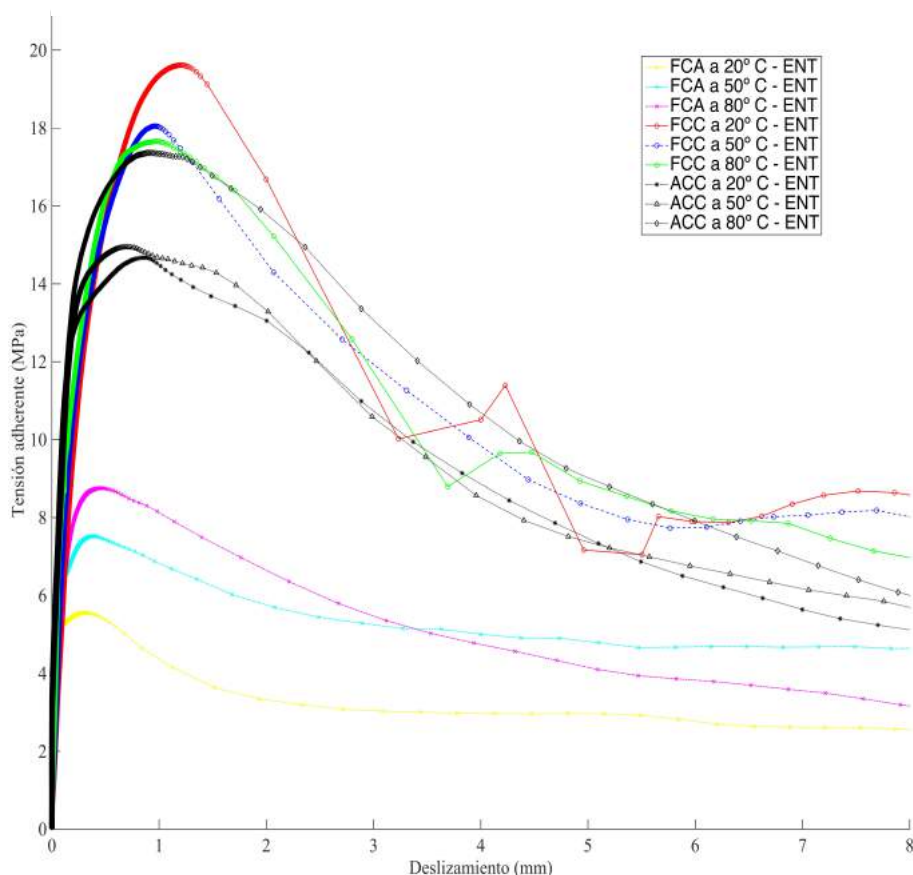


Fig. 4.60.- Gráfica combinada de las barras ACC, FCA y FCC ensayadas a 180 días, representadas por temperatura de 20, 50 y 80 °C, respectivamente.



Finalmente, en la Fig. 4.61 se representan los valores de tensión adherente a los 180 días. Además de lo ya comentado en la Fig. 4.57 de la página 226, resaltar que con la temperatura elevada durante seis meses, la rotura se hace más frágil, apreciándose mayor pendiente en las gráficas, acusando el efecto a los 50 y 80 °C en todas las barras.

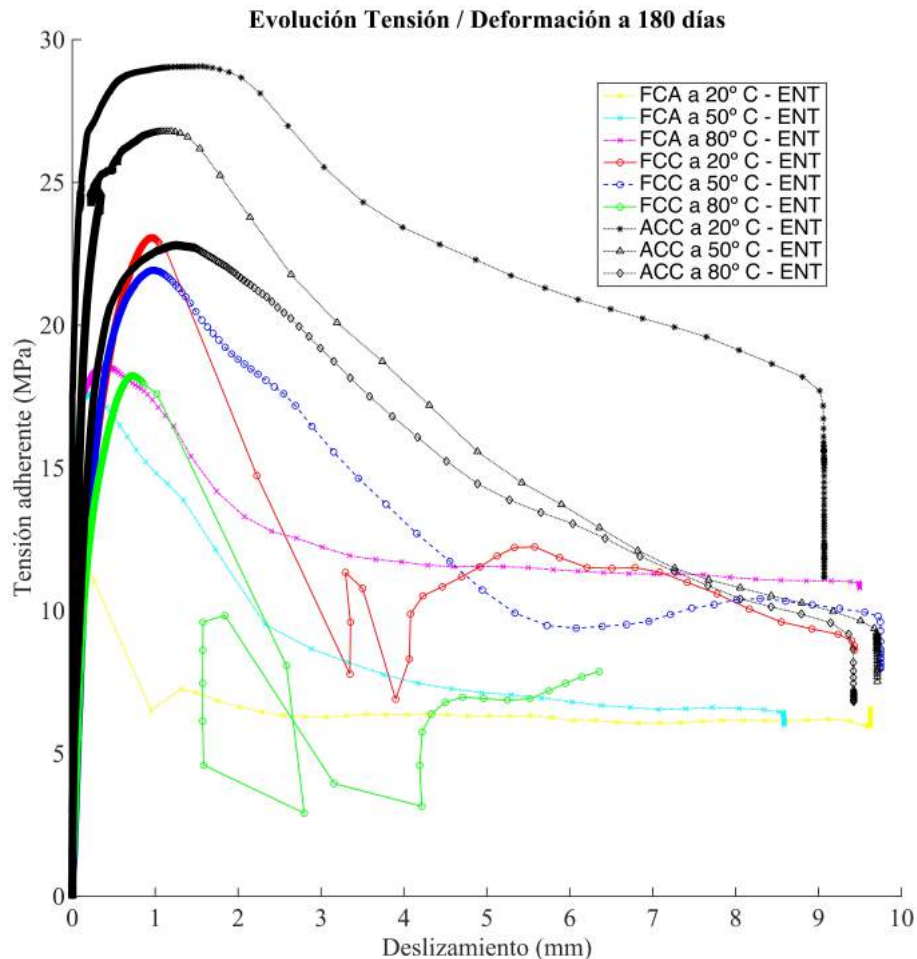


Fig. 4.61.- Gráfica combinada de las barras ACC, FCA y FCC ensayadas a 180 días, representadas por temperatura de 20, 50 y 80 °C, respectivamente.

#### 4.1.5 Correlación de datos y líneas de tendencia para evolución de tensiones adherentes en barras de CFRP

Para sintetizar la evolución de las tensiones adherentes en las barras de CFRP arenadas y corrugadas se han planteado las siguientes gráficas con un propuesta de ecuación logarítmica que aproxima a la tendencia observada en las roturas por ensayos de pullout en la presente investigación.

Las ecuaciones propuestas parten de, conocida la variable temperatura (x), poder obtener la tensión adherente máxima (y) para cada periodo estudiado.

En la Fig. 4.62 se propone la ecuación de tendencia de las barras de CFRP arenadas, mostrando una evolución a los 28 días con mínima pendiente entre las diferentes temperaturas, lo que implica una reducida evolución.



Fig. 4.62.- Línea de tendencia con ecuación logarítmica para evolución de tensión adherente a edad de 28 días y según la temperatura en rango de 20 a 80 °C.

A 60 días cambia la situación, estableciéndose la gráfica reflejada en la Fig. 4.63, donde se muestra un evolución positiva en incremento de tensiones a mayor temperatura.



Fig. 4.63.- Línea de tendencia con ecuación logarítmica para evolución de tensión adherente a edad de 60 días y según la temperatura en rango de 20 a 80 °C.

Y para la máxima duración de estudiada en esta tesis, se plantea la propuesta recogida en la Fig. 4.64, en la que nuevamente se percibe el incremento de tensiones que se produce a 180 días en presencia de mayores temperaturas; hecho relacionado con la resistencia a compresión del hormigón, pero contrastado de igual modo tomando la tensión normalizada.



Fig. 4.64.- Línea de tendencia con ecuación logarítmica para evolución de tensión adherente a edad de 180 días y según la temperatura en rango de 20 a 80 °C.

Para las barras de CFRP corrugadas, se han planteado las siguientes líneas de tendencias, y que reflejan, en su conjunto, el efecto negativo de las altas temperaturas en el comportamiento adherente de este tipo de tratamiento superficial.

En la Fig. 4.65 se percibe la reducción de la tensiones al aumentar la temperatura, proponiendo una ecuación logarítmica para prever el comportamiento adherente.



Fig. 4.65.- Línea de tendencia para FCC con ecuación logarítmica para evolución de tensión adherente a edad de 28 días y según la temperatura en rango de 20 a 80 °C.

A 60 días, la ecuación planteada se recoge en la Fig. 4.66, con pendiente descendente, indicando la pérdida de tensión adherente con el aumento de temperaturas, también a esta edad, y a pesar del aumento de la resistencia a compresión del hormigón.



Fig. 4.66.- Línea de tendencia para FCC con ecuación logarítmica para evolución de tensión adherente a edad de 60 días y según la temperatura en rango de 20 a 80 °C.

En la Fig. 4.67 se refleja, para finalizar, la propuesta de ecuación que prevé el comportamiento adherente al aumentar las temperaturas, y que, pese a que el hormigón ha conseguido un importante incremento de resistencia a compresión, no ha logrado

contrarrestar los efectos de las altas temperaturas en la resina que forma la matriz polimérica del núcleo y la corruga de la barra de CFRP Corrugada.



Fig. 4.67.- Línea de tendencia para FCC con ecuación logarítmica para evolución de tensión adherente a edad de 180 días y según la temperatura en rango de 20 a 80 °C.



## 5 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Una vez completado el plan experimental y su análisis, se procede a concretar aquellos aspectos más relevantes de esta investigación que pudieran contribuir a mejorar el conocimiento de los procesos de adherencia de las barras de CFRP en condiciones climáticas de altas temperaturas.

De igual modo, y a la luz de las premisas obtenidas, se proponen futuras líneas de investigación que permitan avanzar en los aspectos tratados en esta tesis doctoral.

### 5.1 Conclusiones

- 1.- Las barras de CFRP se ven influenciadas por las altas temperaturas en su comportamiento adherente en función del tratamiento superficial específico de cada tipología.
- 2.- Se ha observado que las barras de CFRP corrugadas sufren una reducción del 23,68 % en largos periodos (180 días) y a 80 °C, respecto a la temperatura de control (20 °C). En comparación con las de acero, con una disminución de solo 9,58 %. Aun con ello, siguen siendo viables estructuralmente
- 3.- Con relación a las barras de CFRP Arenadas se constata que no se resienten por las temperaturas de hasta 80 °C a 180 días, alcanzando valores superiores a los de las barras corrugadas a esta edad y temperatura; tiene un comportamiento estable desde los 50 a los 80 °C, con tensiones de 19,28 MPa y 19,27 MPa,

respectivamente, lo que supone que las temperaturas de hasta 80 °C no afectan a la adherencia de este tipo de barras con el hormigón.

4.- A 20 °C, la máxima tensión adherente marcada por los tres tipos de barras es de 18,23 MPa, adquirida por la barras de CFRP corrugadas, frente a los 12,73 MPa de las barras de acero, lo que supone un incremento del 30,17%.

5.- Las barras de CFRP arenadas parecen ser sensibles a la acción del agua. En la investigación se ha comprobado que, en estado de saturación de humedad, los valores de tensión adherente no crecen, permaneciendo estables desde los 28 días, lo que consideramos se debe a la composición de su tratamiento superficial.

6.- El modo de rotura de las barras arenadas es más frágil que el de las corrugadas, acusándose este hecho a temperaturas avanzadas, donde se produce un colapso cuasi-instantáneo del recubrimiento de arena, con el deslizamiento completo de la barra. Este hecho las hace menos adecuadas para el uso estructural, pues la rigidez provoca una disminución en los coeficientes de seguridad.

7.- La temperatura de transición vítrea afecta a la adherencia de las barras de CFRP, produciendo un deterioro en las capas superficiales, responsables de transmitir los esfuerzos al núcleo reforzado con las fibras de carbono.



## **5.2 Futuras líneas de investigación.**

Las posibilidades de nuevos estudios que amplíen el conocimiento en características de las barras de CFRP que se plantean serían:

1.- Analizar el impacto de la humedad en las barras de CFRP, en entornos de diferente salinidad.

2.- Estudiar la combinación de alta humedad relativa y alta temperatura en barras de CFRP.

3.- Influencia de hormigones de alta resistencia en la adherencia de las barras de CFRP.

4.- Explorar nuevas composiciones para los recubrimientos de las barras de CFRP que permitan una mejor resistencia a las altas temperaturas.



## 6 BIBLIOGRAFÍA

Achillides, Z. P. (1997). Bond behaviour of FRP bars to concrete. *roc., 3rd Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures* (págs. 341-348). Sapporo: apan Concrete Society .

Achillides, Z., & Pilakoutas, K. (2004). *Bond behavior of FRP Bars under direct pullout conditions*. Journal of Composites for Construction, vol. 8 (2), pp. 173-181.

ACI 440.1R-03 . (2003). *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars* . Farmington Hills: ACI Report 440.1R-0103 .

ACI 440.1R-06 . (2007). *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars* . ACI Committee 440. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute .

ACI 440.3R-04 . (2004). *Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRP's) for reinforcing or strengthening concrete structures* . Farmington Hills , Michigan, , USA: American Concrete Institute.

ACI 440.5-08 . (2009). *Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars*, . Farmington Hills , Michigan , USA : ACI Committee 440, American Concrete Institute .

ACI 440.6M-08 . (2009). *Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement*. Farmington Hills , Michigan , USA : ACI Committee 440, American Concrete Institute .

ACI 440.6M-08. (2009). *Specification for Carbon an Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement*. Farmington Hills, Michigan, USA: ACI Committee 440, American Concrete Institute.

ACI 440.XR-06 . (2006). *Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures* . Farmington Hills , Michigan , USA: ACI Committee 440, American Concrete Institute .

ACI Committee 215 . (1992). *Consideration for Design of Concrete Structure Subjected to Fatigue Loading* . Detroit , Michigan , USA: CI manual of concrete practice, American Concrete Institute .

ACI: American Concrete Institute. (1996). *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. Detroit: ACI Report 440R-96.

ACMBS-II, E. B. (2004). *Durability of FRP rods for concrete structures* (Vol. vol. 18 ). Construction and Building Materials .

Adimi, R. R. (1998). Effect of Temperature and Loading Frequency onthe Fatigue Life of a CFRP Bar in Concrete. *Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure* . Vol. 2, págs. 203-210 . Tucson: ICCI-98 .

Agarwal, B. a. (1990). *Analysis and Performance of Fibre Composites* (Second edition ed.). New-York , USA: Willey-Interscience .

Aiello, A. L. (1997). Bond performances of FRP rebars-reinforced concrete . *ASCE J. Mater. Civil. Eng.* , Vol.19 (nº 3), 203-210.

Allred, R. (1984). *The effects of temperature and moisture content on the flexural response of Kevlar/epoxy laminates: Part II*. Lancaster: Technomic Publishing Company .

Al-Mahmoud, F. C. (2007). Effect of surface pre- conditioning on bond of carbon fibre reinforced polymer rods to concrete . *Cement & Concrete Composites*, , Vol. 29, 677-689.

Al-Zahrani, M. A.-D. (1999). Evaluation of bond using FRP rods with axisymmetric deformations . *Construction and Building Materials* , Vol. 13, 299-309 .

Ando, N. M. (1997). Experimental Studies on the Long-term Tensile properties of FRP Tendons . *Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures* . Vol. 2, págs. 203-210 . Sapporo: FRPRCS-3 .

Arockiasamy, M. A. (1996). *Long-term behaviour of concrete beams reinforced with CFRP bars under sustained loads*. Montreal: ACMBS-II, El- Badry, M.

ASTM. (2012). *Book of Standards* . West Conshohocken : American Society for Testing and Materials .

ASTM. (2012 ). *Book of Standards* . West Conshohocken : American Society for Testing and Materials .

Baena, M. T. (2009). Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test. En *Composites: Part B* (Vol. Vol. 40, págs. 784–797 ).

Bakis, C. E. (1993). FRP reinforcement: materials and manufacturing. . *Fiberreinforced- plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: properties and applications*. , 13-58 .

Balazs, G. (2007). Conecting reinforcement to concrete by bond . En *Beton und stahlbetonbau* (Vol. Vol. 102 , págs. 46-51 ).

Balazs, G. L. (2001 ). Long-term Behaviour of FRP. In *Proceedings of the International Workshop* . Reston : American Society of Civil Engineers .

Bank, C. G. (1998). Accelerated ageing of pultruded glass/vinylester rods. *Proc. 2nd. Intl. Conf. On Fibre Composites in Infrastructure* , Vol. 2, págs. 423-437 .

Bank, C. G. (1995). Accelerated Test Methods to Determine the Long-Term Behaviour of FRP Composite Structures: Environmental Effects. *Journal of Reinforced Plastic and Composites* , Vol. 14 , 558-587 .

Bank, L. P. (1998). The Effect of Material Degradation on Bond Properties of Fiber Reinforced Plastic Reinforcing Bars in Concrete. *ACI Materials Journal* , Vol. 95 (nº 3), 232-242.

Barbero, E. J. (1999). *Introduction to Composite Materials Design* . Philadelphia: Taylor & Francis .

Beck, D. H. (March de 1963). Experimental data of specific volume vs. Temperatura to determine Tg of polypropylene. *Soc. Plast. Eng. Trans.* , 279.

Benmokrane, B. E.-S.-R. (2004). Design, Construction and Monitoring of Four Innovative Concrete Bridge Decks Using Non-Corrosive FRP Composite Bars . *2004 Annual Conference of the Transportation Association of Canada* .

Benmokrane, B. T. (1996). Bond strength and load distribution of composite GFRP reinforcing bars in concrete. *ACI Materials Journal* , Vol. 93 (Nº 3), 246–253.

Benmokrane, B. W. (2001). Test Methods to Determine Properties of FRP Rods for Concrete Structures. In Proceedings of the International Workshop . *American Society of Civil Engineers* , 75-83 .

Benmokrane, B. Z. (2009). Mechanical and bond properties of new generation of carbon fibre reinforced polymer reinforcing bars for concrete structures . *Canadian Journal Civil Engineers* , Vol. 29, 338–343.

Benmokrane, B. Z. (2000). Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications . *Construction and Building Materials* , Vol. 14, 157-170.

Bisby, L. G. (29 de abril de 2005). Response to fire of concrete structures that incorporate FRP. *Progress in structural engineering and materials* , 136-149.

Bisby, L. W. (2005). . Fire Performance of FRP Systems for Infrastructure: A State-of-the-Art Report . *Research Report* (2005).

Bootle, J. B. (2001). Design Guidelines. En A. International, *ASM Handbook Volume 21 Composites* (págs. 388-395). Ohio.

Boyle, M. M. (2001). Epoxy resins . En *ASM Handbook Volume 21 Composites* (págs. 78-89). Ohio : ASM International .

Budelman, H. R. (1993). Creep Rupture Behaviour of FRP Elements for Prestressed Concrete-Phenomenon, Results and Forecast Models . *ACI International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures* , (págs. 87- 100 ). Vancouver .

Byars, .. W. (2001). Durability of FRP in Concrete: Deterioration Mechanisms . *FRP Composites in Civil Engineering* , Vol. 2, 1517–1525 .

Byars, A. D. (1999-2001). Development drafts of a model European durability specification for FRP concrete . *Venice and Cambridge meetings of fib Task Group 9.3* . Riga.

Byars, A. W. (2001). Durability of FRP in Concrete: Current Specifications and a New Approach. *FRP Composites in Civil Engineering* , Vol. 2.

Byars, A. W. (2003). Durability of FRP in Concrete–Current Specifications and a New Approach . *International Journal of Materials and Product Technology* , Vol. 19 (Nº 1), 40-52.

Callister, W. D. (1996). *Materials Science Engineering. An Introduction. Third Edition*. New York: ED. REVERTÉ.

Calvet, V. (2014). *Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón*. Valencia, Valencia, España: Universitat Politècnica de València.

CAN/CSA-S806-02, C. (2002). Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers. *Canadian Standards Association International* .

CAN/CSA-S806-02: . (2002). *Design and construction of building components with fibre reinforced polymers* . Ontario : Canadian Standards Association .

Castañeda-Valdez, A., & Rodriguez-Rodriguez, M. (2014). Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. . *CENIC Ciencias Químicas* , 45, 52-59.

CEB-FIP. (1990). *Model Code 1990* . (T. T. Ltd., Ed.) London: Comité Euro-International de Béton .

Chaallal, O. B. (1993). Pullout and bond of glass-fibre rods embedded in concrete and cement grout. *Materials Structure* , Vol. 26 (Nº 3), 167–175.

Chang, K. K. (2001). Aramid Fibers. *ASM Handbook Volume 21 Composites* , 41-45.

Chateauminois, A. C. (1993). *Effects of hygrothermal aging on the durability of glass/epoxy composites. Physico-chemical analysis and damage mapping in static fatigue*, . Proc. ICCM '93 .



CHBDC. (1996). *Section 16: Fibre reinforced structures*. Canada.

Chen, Y. D. (2007). Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures. *Composite Structures* , Vol. 78, 101–111 .

Chin JW, N. T. (1997). Effects of Environmental Exposure on Fiber- Reinforced Plastic (FRP) Materials Used in Construction . *Journal of Composites Technology and Research* , Vol 19 (Nº 4), 205-213.

CISPI, Composites Institute of the Society of the Plastics Industry. (1992). *Introduction to Composites*. Washington, DC.

Clarke, L. S. (1998). Designing Durable FRP Reinforced Concrete Structures . *Durability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction. Proc. 1st Intl. Conf. (CDCC' 98)* , (págs. 3-24 ). Sherbrooke .

CNR-DT 203/2006 . (2007). *Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymers bars* . Rome , Italy: Advisory committee on technical recommendations for construction .

Cosenza, E. M. (1997). Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete. *Journal Composite Construction* , Vol. 1 (Nº 2), 40-51.

Cosenza, E. M. (1996). Bond characteristics and anchorage length of FRP rebars. *Advanced Composite materials in bridges and structures* (págs. 909–916). Montreal: Canadian Society for Civil Engineering.

Cosenza, E. M. (2002). Development length of FRP straight rebars. *Composites B* , Vol. 33 (Nº 7), 493-504.

Cossis, F. T. (1998). Polyester and vinyl ester resins. En S. Peters (Ed.), *Handbook of Composites* . New York: Chapman & Hall .

Cox, J. C. (2003). Bond between Carbon Fiber Reinforced Polymer Bars and Concrete. II: Computational Modeling. *Journal of Composites for Construction* , Vol. 7 (Nº 2), 164-171.

CSA. (2000). *Canadian Standards Association: Canadian Highways Bridge Design Code* . Section 16, Fiber Reinforced Structures .

Curtis, P. T. (1989). The Fatigue Behavior of Fibrous Composite Materials . *Journal of Strain Analysis* , Vol. 24 (Nº 4), 235-244.

Darwin, D. G. (1993). Effect of Deformation Height and Spacing on Bond Strength of Reinforcing Bars. *ACI Structural Journal* , Vol. 90 (Nº 6), 646-657.

Davalos, J. C. (2008). Effect of FRP bar degradation on interface bond with high strength concrete . *Cement & Concrete composites* , vol. 30 , págs. 722-730.

Devalapura, R. G. (1998). Evaluation of GFRP performance using accelerated test methods . *Proc. CDCC '98* . Québec: Benmokrane, B. and Rahman, H.

Dewprashad, B. E. (1994). Fundamentals of epoxy formulation. *Journa Chemical Education* , Vol. 71 (Nº 4), 290-294.

Echevarría Líbano, R. B. (s.f.). Recuperado el 7 de Septiembre de 2016, de <http://personal.us.es/echevarria/documentos/IntroduccionMATLAB.pdf>

Edwards A.D., Y. P. (1978). Local bond stress-slip relationship under repeated loading. *Magazine of Concrete Research* , Vol. 30 (Nº 103), 62-72.

EHE-08. (2008). *Instrucción Hormigón Estructural*. Madrid, Spain: Ministerio de Fomento.

Ehsani, M. R. (1997). Bond behavior of deformed GFRP bars. *Journal of Composite Materials* , Vol. 31 (Nº 14), 1413-1430.

Ehsani, M. R. (1997). Transfer and flexural bond performance of aramid and carbon FRP tendons. *PCI Journal* , Vol. 42 (Nº 1), 76-86.

Eligehausen, R. P. (1983). Local bond stress–slip relationships of deformed bars under generalized excitations. *EERC Report* (Nº 83).

Esfandeh, M. S. (2009). Bond Performance of FRP Rebars With Various Surface Deformations in Reinforced Concrete . *Polymer Composites* , Vol. 30 , 576-582 .

Faza, S. (1991). *Bending and bond behavior and design of concrete beams reinforced with fiber reinforced plastic rebars*. Morgantown: West Virginia State University.

Faza, S. G. (1992). Glass FRP Reinforcing Bars for Concrete. Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications. *Developments in Civil Engineering* , Vol. 42, 167-188.

Feih S., B. ., (2009). Strength degradation of glass and carbon fibres at high temperature. *Journal of Materials Science* , Vol. 44 (Issue 2), 392-400.

Fernández, M. (2003). *Evaluación No Lineal de los efectos estructurales producidos por las deformaciones diferidas del hormigón y el acero*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Ferry, J. D. (1980). *Viscoelastic Properties of Polymers* (3rd edition ed.). Willey, New York.

FIB. (2000). Bond of reinforcement in concrete. *State-of-art Report* (Bulletin 10).

FIB. Task Group 9.3 . (2007). *RP reinforcement in RC structures: Design and use of fibre reinforced polymer reinforcement (FRP) in reinforced concrete structures* . Lausanne , Switzerland : Federation Internationale de Beton Task Group 9.3 .

Focacci, F. N. (2000). Local bond–slip relationship for FRP reinforcement in concrete. *Journal Composites Construction* , Vol. 4 (Nº 1), 24-31.

Fortec Stabilization, Inc. (2010). <http://www.fortecstabilization.com/>. Recuperado el 8 de diciembre de 2016

Galati, N. N. (2006). Thermal effects on bond between FRP rebars and concrete. En *Composites: Part A* (Vol. Vol. 37, págs. 1223–1230).

GangaRao, H. N. (2007). *Reinforced concrete design with FRP composites* . Boca Raton, Florida, USA: Taylor & Francis Group .

GangaRao, S. V. (1997). “Aging of Structural Composites Under Varying Environmental Conditions, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures”. (págs. 91-98). Proc. 3rd Intl. Symp., vol. 2.

Gay, D. H. (2003). *Composite Materials. Design and Applications* . Boca Raton: CRC Press.

Gibson, F. (1994). *Principles of Composite Material Mechanics* . New York : McGraw-Hill .

Guigon, M. O. (1984). *Fibre Sci. Technol.*, Vol. 20, pág. 1777.

Guo, J. C. (2000). An interface model for the mechanical interaction between FRP bars and concrete. *Jour. Reinfor. Plastics and Composites* , vol. 19 (Nº 1 ), 15-33.

Hamad, B. (1995). Bond Strength improvement of Reinforcing Bars with Specially Designed Rib Geometrie. *ACI Structural Journal* , Vol. 92 (Nº 1), 3-13.

Hamad, B. (1995). Comparative Bond Strength of Coated and Uncoated Bars with Different Rib Geometries. *ACI Materials Journal* , Vol. 92 (Nº 6), 579-590.

Hamad, R. J. (21 de marzo de 2017). Mechanical properties and bond characteristics of different fiber reinforced polymer rebars at elevated temperatures . *Construction and Building Materials* , 521-535.

Hao, Q. W. (2009). Bond strength of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars in normal strength concrete. *Construction and Building Materials* , Vol. 23, 865-871.

Hollaway, L. (1993). *Polymer Composites for Civil and structural Engineering* . Glasgow : Blackie Academic & Professional .

Hull, D. C. (1996). *An Introduction to Composite Materials* (2nd edition ed.). Cambridge: University Press.

ISIS Canada . (2006). Recuperado el September de 2006, de <http://www.isiscanada.com>

IStructE . (1999). *Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures using Fibre* . London, England: Institution of Structural Engineers .

Joisel, A. (1981). *Fisura y grietas en morteros y hormigones. Sus causas y remedios*. Barcelona, Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados.

JSCE 1997(b) . (1997). *Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing*

*materials* . Tokyo , Japan: Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers .

Kanakubo, T. Y. (1993). Bond performance of concrete members reinforced with FRP bars. *ACI international symposium on FRP reinforcement for concrete structures* (págs. 767-788). Vancouver: ACI. SP-138.

Karbhari, M. C. (2003). *Mechanics of Composite Structures*. New York: Cambridge University Press.

Kato, Y. N. (1998). *The effect of ultraviolet rays to FRP rods* . Sherbrooke, Québec, Canada: Proc. CDCC '98, Benmokrane, B. and Rahman, H. (Eds.) .

Katz, A. B. (1999). Effect of high temperature on bond strength of frp rebars . *Journal of Composites for Construction* , vol. 3, no. 2 , págs. 73-81.

Katz, A. B. (2000). Modeling the effect of high temperature on the bond of FRP reinforcing bars to concrete . *Cement & Concrete Composites* , vol. 22, pág. 433.

Katz, A. (1999). Bond mechanism of FRP rebars to concrete . *Materials and Structures/Matériaux et Constructions* , vol. 32 , págs. 761-768 .

Kelen, T. (1983). *Polymer Degradation*. New York: Van Nostrand Reinhold Co.

Kollár, L. P. (2003). *Mechanics of Composite Structures*. New York: Cambridge University Press.

Kumahara, S. M. (1993). Tensile Strength of Continuous Fiber Bar under High Temperature. En A. a. Nanni (Ed.), *International Symposium on Fiber Reinforcement Plastic Reinforcement for Concrete Structures, SP-138* (págs. 731-742). Farmington Hills: American Concrete Institute.

Larralde, J. S.-R. (1993). Bond and slip of FRP rebars in concrete. *Journal Materials Civil Engineers* , Vol. 5 (Nº 1), 30-40.

Lawrence, C. B. (2006). *Composites for construction: structural design with FRP materials*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & sons, Inc.

Lee, J. K. (2008). Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete. En *Composites: Part B* (Vol. Vol. 39, págs. 258-270).

Lublóy, E. B. (2005). Bond of CFRP wires under elevated temperature. *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS)* , 163– 168.

Machida, A. (1997). *Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials*. Tokyo, Japan: Concrete Engineering Series 23, Japan Society of Civil Engineers.

Machida, A. (1993). *State-of-the-Art Report on Continuous Fiber Reinforcing Materials*. Tokyo, Japan: Society of Civil Engineers (JSCE).

Mallick, K. (1988). *Fiber Reinforced Composites, Materials, Manufacturing and Design*. New York: Marcel Dekker Inc.

Mallick, P. (1993 ). *Fiber Reinforced Composite Materials: Manufacturing and Design* . New York : Marcel Dekker .

Malvar, L. C. (2003). Bond between carbon fiber reinforced polymer bars and concrete. I. Experimental study. *ASCE Journal of Composites for Construction* , Vol. 7 (Nº 2), 154–163.

Malvar, L. J. (2003). Environmental Effects on the Short-Term Bond of Carbon Fiber-Reinforced Polymer CFRP Composites. *Journal of Composites for Construction* , Vol. 7 (Nº 1), 58-63.

Malvar, L. (1995). Tensile and Bond Properties of GFRP Reinforcing Bars. *ACI Materials Journal* , Vol. 92 (Nº 3), 276-285.

Marshall Composite Systems LLC. (1999). *Cataloge C-Bar*. (O. 9. 2873 22nd St. NE Salem, Editor) Recuperado el November de 2016, de <http://www.marshallcomposite.com/>

Masmoudi, A. M. (2010). Thermal effects on GFRP rebars: experimental study and analytical analysis. *Materials and Structures* , Vol. 43, 775-788.

Masmoudi, R. A. (2005). Thermal effect on bond properties of frp bars embedded in concrete. *33 rd Annual General Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, (págs. 3115-3124).

Masmoudi, R. M. (2011). Long-term bond performance of GFRP bars in concrete under temperatura ranging from 20 oC to 80 oC. *Construction and Building Materials* , Vol. 25, 486–493.

Masood Rafi, M. N. (2007). Analytical Modeling of Concrete Beams Reinforced with CarAnalytical Modeling of Concrete Beams Reinforced with Carbon FRP Barsbon FRP BarsAnalytical Modeling of Concrete Beams Reinforced with Carbon FRP Bars. *Journal of Composite Materials* .

Meier, U. (s.f.). Carbon Fiber Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering. *Structural Engineering International* .

Micelli, F. N. (2004). *Durability of FRP rods for concrete structures* (Vol. vol. 18 ). Construction and Building Materials .

Miklofsky, H. A. (1965). *Further studies of epoxy bonding compounds*. Washington, D.C.: National Academy of Sciences, National Research Council.



Nanni, A. B. (1995). Test Methods for FRP-Concrete Systems Subjected to Mechanical Loads: State of the Art Review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* , Vol. 14, 524-588.

Nanni, A. D. (1993). Fiber Reinforced Plastic. *Reinforcement for Concrete Structures International Symposium* (pág. 977). Farmington Hills: SP-138, American Concrete Institute.

Nanni, A. (1993). Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications. *Developments in Civil Engineering* , Vol. 42, 450.

Nanni, A. (2001). Guide and Specifications for the Use of Composites in Concrete and Masonry Construction in North America. *In Proceedings of the International Workshop Composites in Construction: A Reality* (págs. 9-18). Reston: American Society of Civil Engineers .

Nanni, A., A.-Z. M.-D. (1995). Bond of reinforcement to concrete – experimental results. *Proceedings of second international RILEM symposium (FRPRCS-2)* (págs. 114–117). London: E and FN Spon.

Narendra, T. G. (2001). Bond behavior of FRP reinforcing bars-The state of the art. *46 th. International SAMPE Symposium*, (págs. 1784-1796).

Neville, M. (1996). *Properties of Concrete* (Fourth edition ed.). Harlow, England: Addison Wesley Longman Limited.

Nielsen, E. (1974). *Mechanical Properties of Polymers and Composites, Volume 2*. New York: Marcel Dekker,.

Odagiri, T. M. (1997). Fatigue and Relaxation Characteristics of Continuous Aramid Fibre Reinforced Plastic Rods. *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, (págs. 227-234). Sapporo.

Okamoto, T. M. (1993). Practical Application and Performance of PPC Beams Reinforced with Braided FRP Bars. En A. a. Nanni (Ed.), *International Symposium on Fiber-Reinforcement-Plastic, Reinforcement for Concrete Structures, SP- 138* (págs. 875-894). Farmington Hills: American Concrete Institute.

Okelo, R. Y. (2005). Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete. *Journal of Composites for Construction* , Vol. 9 (Nº 3), 203-213.

Paciornik, S. M. (2003). Analysis of the mechanical behavior and characterization of pultruded glass fiber-resin matrix composites. En *Composites Sci. Tech.* (Vol. Vol. 63, págs. 295-304).

Park, R. P. (1983). *Estructuras de concreto reforzado*. Mexico: Editorial Limusa.

Parkyn, B. (1985). *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering* . New York : John Wiley & Sons .

Pecce, M. M. (2001). Experimental and analytical evaluation of bond properties of GFRP bars. *Journaul Materials Civil Engineers* , Vol. 13 (Nº 4), 282-290.

Penn, L. S. (1998). *Handbook of Composites: Epoxy Resins*. Springer US.

Pepper, T. (2001). Polyester Resins. En *ASM Handbook Volume 21 Composites* (págs. 90-96). ASM International.

Peters, S. T. (1998). *Handbook of composites* . Mountain View , California, USA: Chapman & Hall .

Peters, S. T. (1998). *Handbook of composites*. Mountain View, California, USA: Chapman & Hall.

Plecnik, J. A. (1998). *Transfer of Composite Technology to Design and Construction of Bridges*. Final Report to USDOT.

Porter, L. M. (1997). Aging Degradation of fibre composite reinforcement for concrete structures . *Advanced Comp. Mats.in Bridges and Structures, 2nd Int. Conference* , (págs. 641-648). Canada.

Pritchard, G. S. (1998). Effects of temperature on stress-rapture times in glass/polyester laminates . *Composites* , vol. 19, n° 1 , págs. 29-35.

Protasio, F. C. (1998). Tensile and nondestructive testing of frp bars. *Journal of Composites for Construction* , Vol. 2 (N° 1), 17-27.

Pulltrall Inc. (2012). *Cataloge V-ROD-Specifications Carbon*. Thetford Mines, Québec, Canada.

Rafi, M. N. (2007). Fire resistance of carbon FRP reinforced-concrete beams. *Magazine of concrete research* , 59 (4), 245-255.

Rahman AH, K. C. (1998). Experimental Investigation of the Mechanism of Deterioration of FRP Reinforcement for Concrete . *Proc. 2nd Intl. Conf. On Fibre Comp.in Infrastructure* . Vol. 2 , págs. 501-511. ICCI'98 .

Rao, R. B. (1981). *Factors affecting moisture absorption in polymer composites* (Vols. Part-II, Influence of External Factors, Environment Effects on Composite Materials, vol. III, Springer). (T. P. Company, Ed.) Lancaster.

RILEM. (1983). *Bond test for reinforcing steel 2: pullout test. Recommendation RC6*.

Rizkalla, S. H. (1997). A New Generation of Civil Engineering Structures and Bridges. *Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3). Vol. I*, págs. 113-128. Tokyo: Japan Concrete Institute.

Rizkalla, S. M. (2001). Reinforcing Concrete with Fibre Reinforced Polymers. En *ISIS Design Manual No 3*. Manitoba: ISIS Canada.

Robert, M. B. (2010). Behavior of GFRP Reinforcing Bars Subjected to Extreme Temperatures. *Journal of Composites for Construction* , Vol. 14 (Nº 4).

Rope, T. (2000). *CFCC, Carbon Fiber Composite Cable*. Tokyo: Tokyo Rope Manufacturing Co.

Rossetti, V. G. (1995). Local bond stress–slip relationships of glass fibre reinforced plastic bars embedded in concrete. *Materials Structure* , Vol. 28 (Nº 6), 340–344.

Rostasy, F. (1996). Materials properties. *Fiber composites in infrastructure* (págs. 41-241). Tucson: Proc. conference.

Saadatmanesh, H. T. (1999). Durability of FRP rebars and tendons, Non-Metallic (FRP) Reinf. For Conc. Structures . *Proc. 3rd Intl. Symp.* , vol. 96 , págs. 143-153.

Saadatmanesh, H. T. (1999). Durability of FRP rebars and tendons, Non-Metallic (FRP) Reinf. For Conc. Structures. *Proc. 3rd Intl. Symp.*, Vol. 2 , págs. 147-154.

Saadatmanesh, H. T. (1999). Long-term Behavior of Aramid Fiber Reinforced Plastic (AFRP) Tendons. *ACI Materials Journal* , Vol. 96 (Nº 3), 297-305.

Saafi, M. (2002). Effect of Fire on FRP Reinforced Concrete Members. *Composite Structures* , Vol. 6 (nº 58), 11-20.

Sakashita, M. M. (1997). Deflection of Continuous Fiber Reinforced Concrete Beams Subjected to Loaded Heating. *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)* , Vol. 2, págs. 51-58. Sapporo.

Sasaki I, N. I. (1997). Durability Evaluation of FRP Cables by Exposure Tests . *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures . Vol. 2* , págs. 131-137. Proc. 3rd Intl. Symp. .

Schaff, R. (2001). Fatigue and Life Prediction. En *ASM Handbook Volume 21 Composites* (págs. 252-258). Material Park, Ohio: ASM International.

Schapery, A. (1968). Thermal Expansion Coefficients of Composite Materials Based on Energy Principles. *Journal of Composite Materials , Vol. 2* (Nº 3), 380-404.

Scheibe, M. R. (1997). Stress-rupture of AFRP subjected to alkaline and elevated temperatures. *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proc 2nd Intl. Symp. on fiber composites in infrastructure, ICCI'98, Vol. 2*.

Schwartz, M. (1992). *Composite Materials Handbook* (2nd Edition ed.). New York: McGraw-Hill.

Seki, H. S. (1997). Test Method on Creep of Continuous Fiber Reinforcing Materials. *Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3) , Vol. 2*, págs. 195-202. Sapporo.

Sen R, S. M. (1997). Durability of AFRP & CFRP pretensioned piles in a marine environment . *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proc. 3rd Intl. Symp , Vol 2* , págs. 123-130 .

Sen, R. S. (1998). Durability of AFRP pretensioned elements in a marine environment. *ACI Structure Journal , Vol. 95* (Nº 5), 578-587.

Sheard P, C. J. (1997). EUROCRETE – Taking Account of Durability for Design of FRP Reinforced Concrete Structures . *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures . Vol 2* , págs. 75-82. Proc. 3rd Intl. Symp. .

Shield, C. F. (1997). Thermal and Mechanical Fatigue Effects on GFRP Rebar-Concrete Bond . *Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)* , Vol. 2, págs. 381-388 . Tokyo.

Sika S.A.U. (2011). *Cataloge CarboDur Rods* . Recuperado el Septiembre de 2016, de <http://esp.sika.com/>

Steckel GL, H. G. (1998). Environmental Durability of Composites for Seismic Retrofit of Bridge Columns . *Proc. 2nd Intl. Conf. on Fibre Composites in Infrastructure* . Vol. 2 , págs. 460-475 . ICCI'98 .

Sturgeon, J. B. (1978). Creep of fibre reinforced thermosetting resins. En C. D. Pomeroy, *Creep of Engineering Materials* . Cambridge: Heffers Printers Ltd. .

Suratno, B. Y. (1998). Simulation of temperature and curing profiles in pultruded composite rods . En *Composites Sci. Tech.* (Vol. Vol. 58 , págs. 191-197).

Tadros, G. T. (1998). University Drive/Crowchild Trail Bridge Superstructure Replacement. *Second International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI-98)*, Vol. 1, págs. 191-197. Tucson.

Taerwe, L. (1997). FRP Activities in Europe: Survey of Research and Applications. *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)* . Vol. 1, págs. 59-74 . Tokyo: Japan Concrete Institute .

Takewaka, K. K. (1996). Deterioration of Stress-Rupture of FRP Rods in Alkaline Solution Simulating as Concrete Environment,. En M. M. El-Badry (Ed.), *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures* (págs. 649-664 ). Montreal, Québec, Canada: Canadian Society for Civil Engineering .

Taly, N. G. (2001). Bond behavior of FRP reinforcing bars, The state of the art. *46th International SAMPE Symposium and Exhibition, Volume 46 II*, págs. 1784-1796. Long Beach.

Tamusz, V. A. (2001 ). The performance of bond of FRP reinforcement in concrete . *6 th International SAMPE Symposium* , (págs. 1738-1748).

Tannous, E. S. (1998). Durability and long-term behavior of carbon and aramid FRP tendons . *Proc. 2nd Intl. Conf. on fiber composites in infrastructure. Vol. 2*, págs. 524-538. ICCI'98 .

Tepfers, R. (1973). *A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars* (Vol. 328). (D. o. Structures, Ed.) Goteborgc, Sweden: Ed. Chalmers University of Technology.

Tepfers, R. a. (1997). Pull-out and tensile reinforcement splice tests using FRP C-bars' . *3rd Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures . Vol. 2*, págs. 357-364. apanese Concrete Institute .

Tepfers, R. (2006). Bond clause proposal for FRP-bars/rods in concrete based on CEB/FIP Model Code 90. Part 1: design bond stress for FRP reinforcing bars . *Structure Concrete , Vol. 7* (Nº 2), 47-55.

Tepfers, R. D. (2003). Bond of FRP reinforcement in concrete . *Mechanics of Composite Materials , Vol. 39* (Nº 4), 315-328.

Tighiouart, B. B. (1998). Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Construction and Building Materials , Vol. 12*, 453-462.

Tomosawa, F. N. (1997). Evaluation of ACM Reinforcement Durability By Exposure Test. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. *3rd Intl. Symp., Vol. 2*, págs. 139-146.

Toutanji, H. E.-K. (1998). Tensile Durability Performance of Cementitious Composites Externally Wrapped with FRP Sheets. *Proc. 2nd Intl. Conf. on Fibre Composites in Infrastructure. Vol. 2*, págs. 410-421. ICCI'98.

Vijay, P. G. (2000). *Mechanical Characterization of Recycled Thermoplastic Polymers for Infrastructure Applications*. Ottawa, Canada: ACMBBS-3.

Vijay, P. H. (1999). *Accelerated and Natural Weathering of Glass Fiber Reinforced Plastic Bars* (Vol. 188). American Concrete Institute.

Wai How, S. R. (2011). Fundamental mechanisms of bonding of glass fiber reinforced polymer reinforcement to concrete . *Construction and Building Materials* , Vo. 25, 56-61.

Wang, N. E. (1995). Collapse of Continuous Fiber Composite Beam at Elevated Temperatures . *Composites* , Vol. 26 (Nº 1), 56-61.

Wang, Y. W. (2007). An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures. *Composite Structures* , Vol. 80, 131–140.

Xu, X. Experimental Study and Numerical Simulation of Bond Behaviors Between FRP Bar and Concrete . *Advanced Materials Research* , Vol. 168-170 , 2134- 2138 .

Yamaguchi, T. K. (1997). Creep Rupture of FRP Rods Made of Aramid, Carbon and Glass Fibers. *Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)* . Vol. 2, págs. 179-186 . Japan Concrete Institute.

Ye, P. F. (2003). FRP in Civil Engineering in China: Research and Applications . *Sixth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6)* (pág. 1401 ). Singapore : K. H. Tan .



Yuan, W. a. (2001). Buckling Analysis of Concrete-Filled FRP Tubes . *41 International Journal of Structural Stability and Dynamics* . World Scientific .

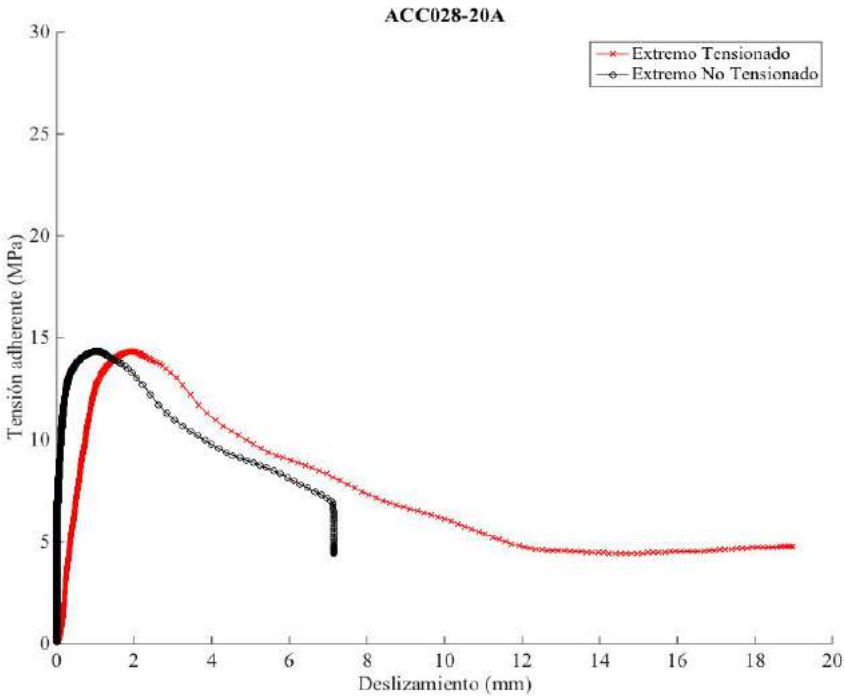
Yuan, W. M. (2001). *Buckling Analysis of Concrete-Filled FRP Tubes* . (W. Scientific, Ed.) International Journal of Structural Stability and Dynamics .

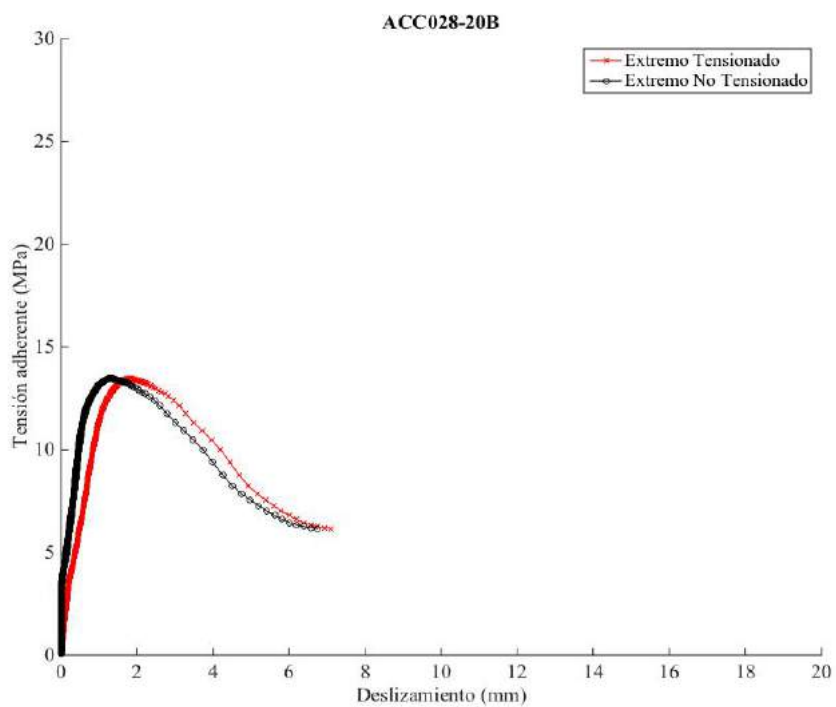


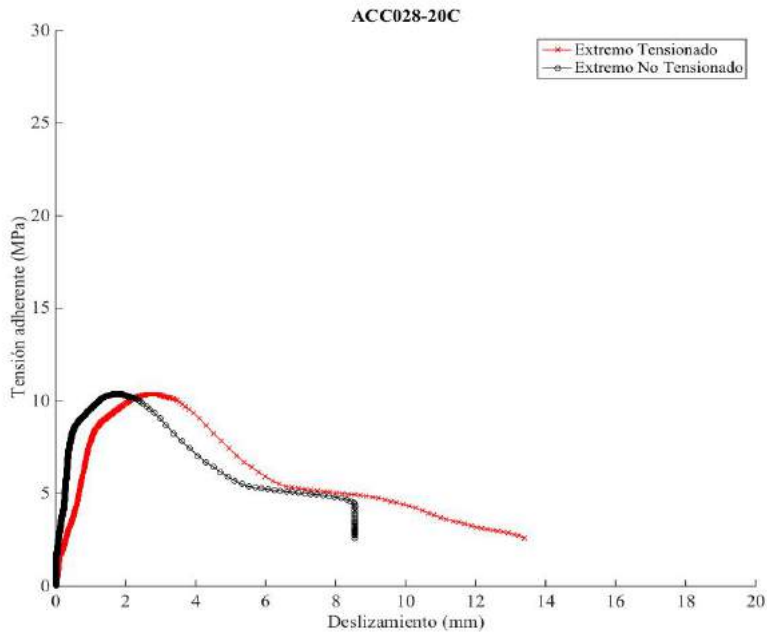
## 7 ANEXO I. GRÁFICAS

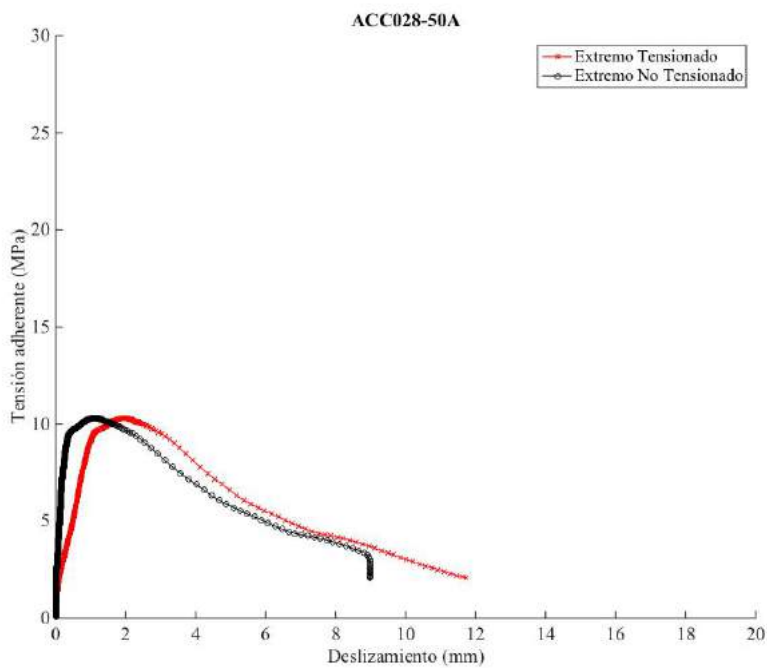
Se adjuntan unas fichas individualizadas de cada probeta ensayada a pullout, en las que se incorpora la gráfica Tensión adherente / Deformación en extremos tensionado (ET) y en extremo no tensionado (ENT).

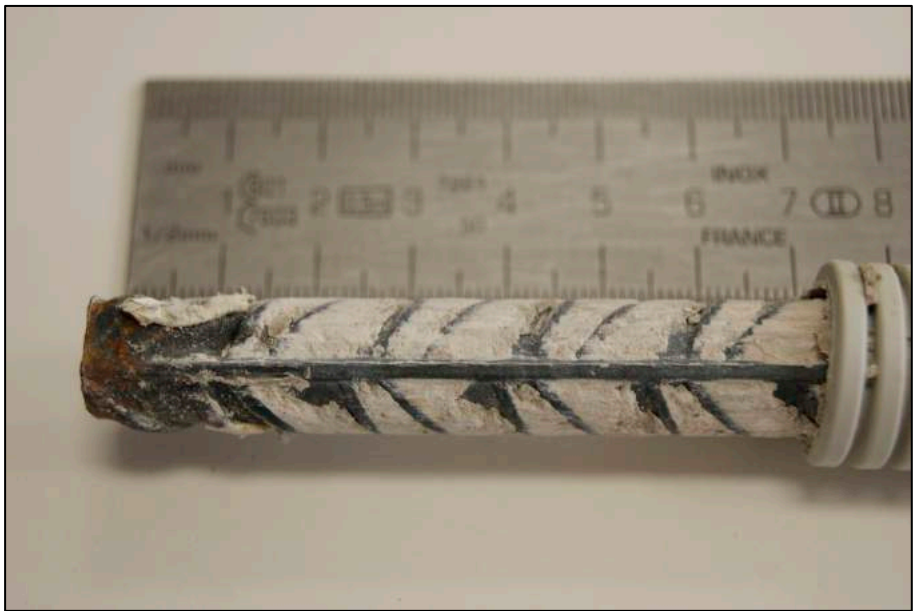
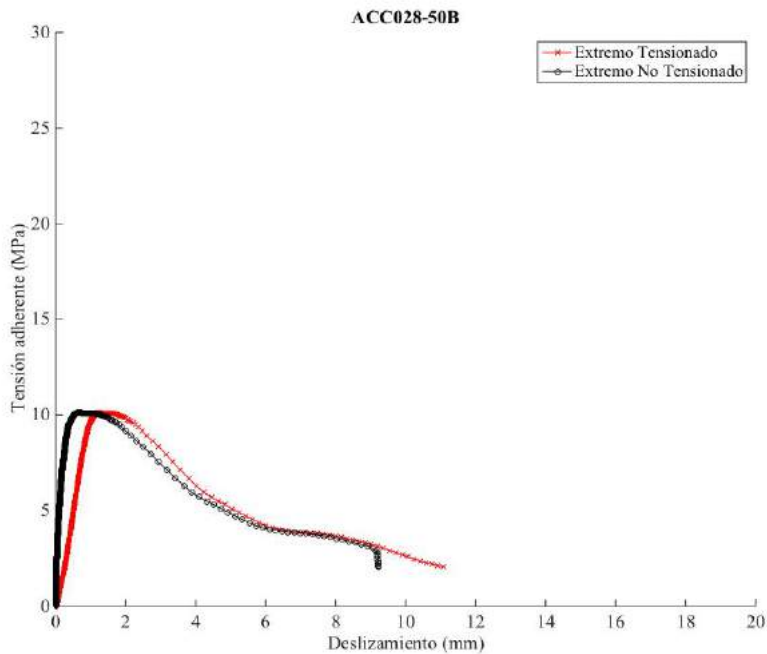
Además, y para ayudar a la comprensión del fenómeno adherente específico, se acompaña una imagen de los ensayos de microscopía o fotografías de reporte para ilustrar el mecanismo adherente movilizado en cada caso.



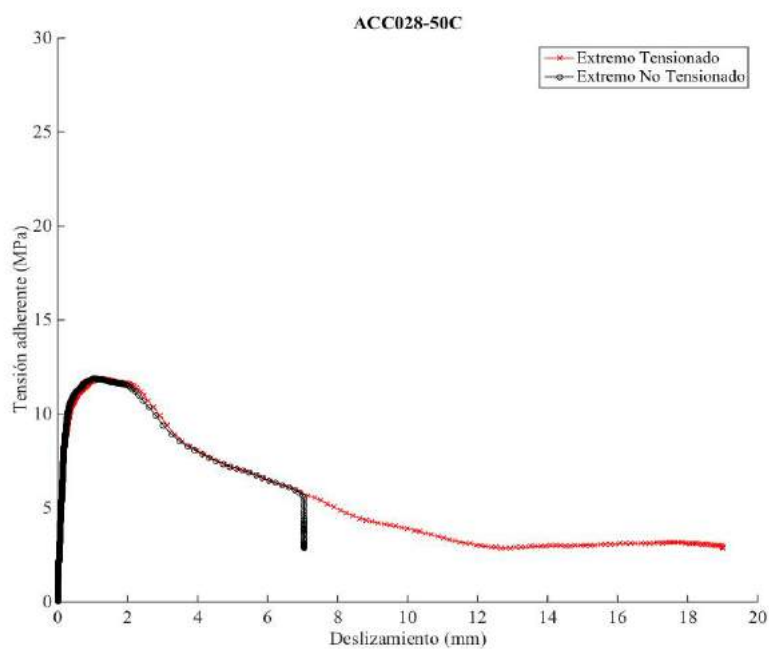


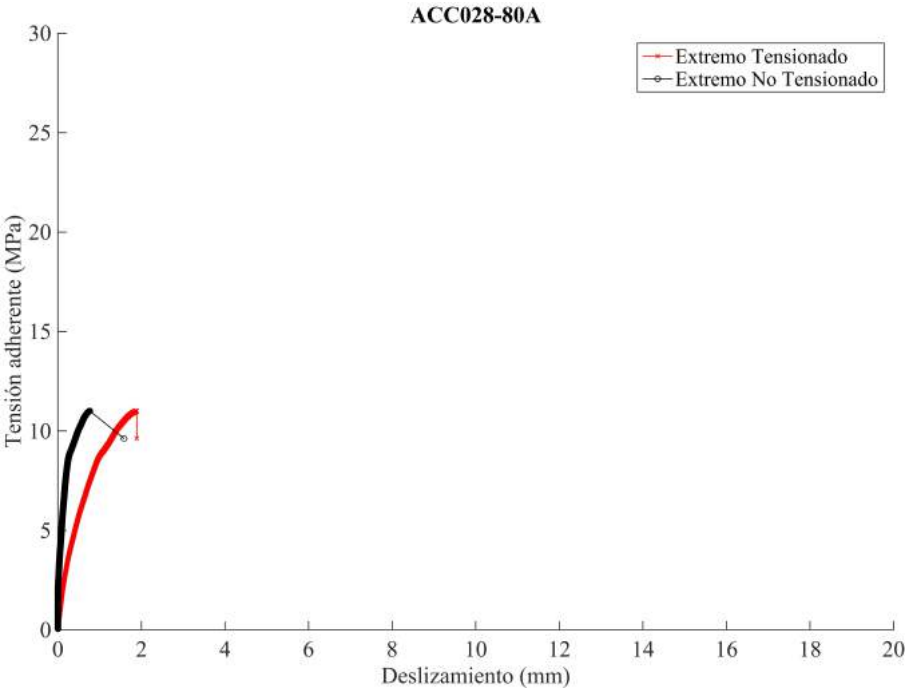


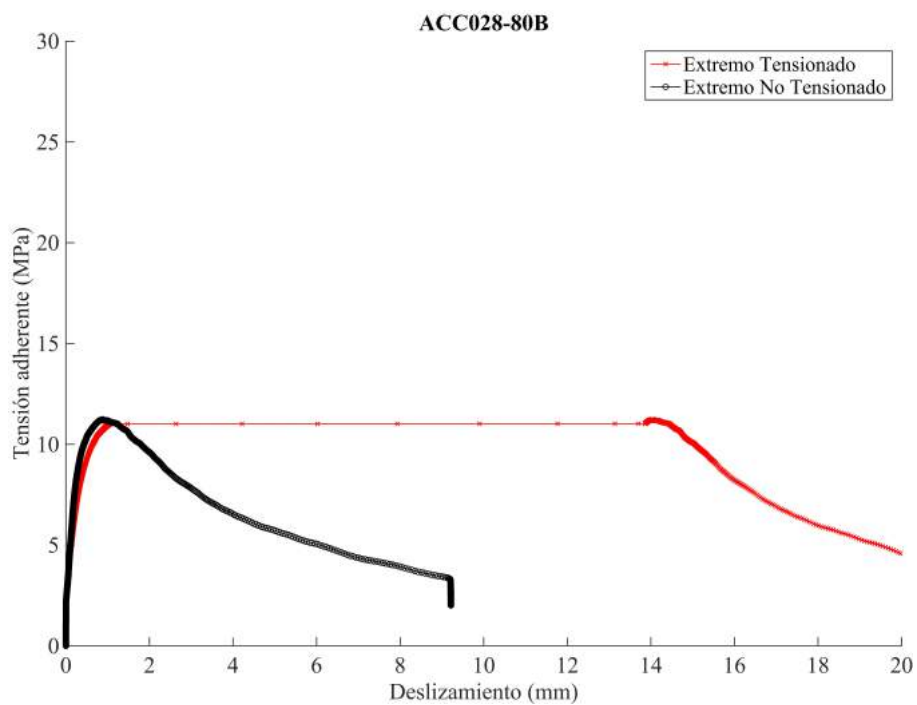


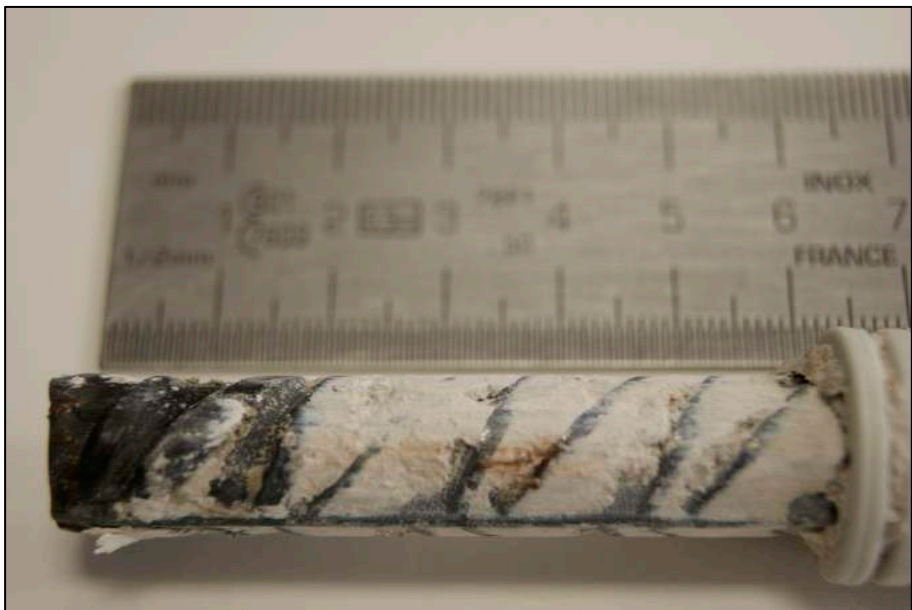
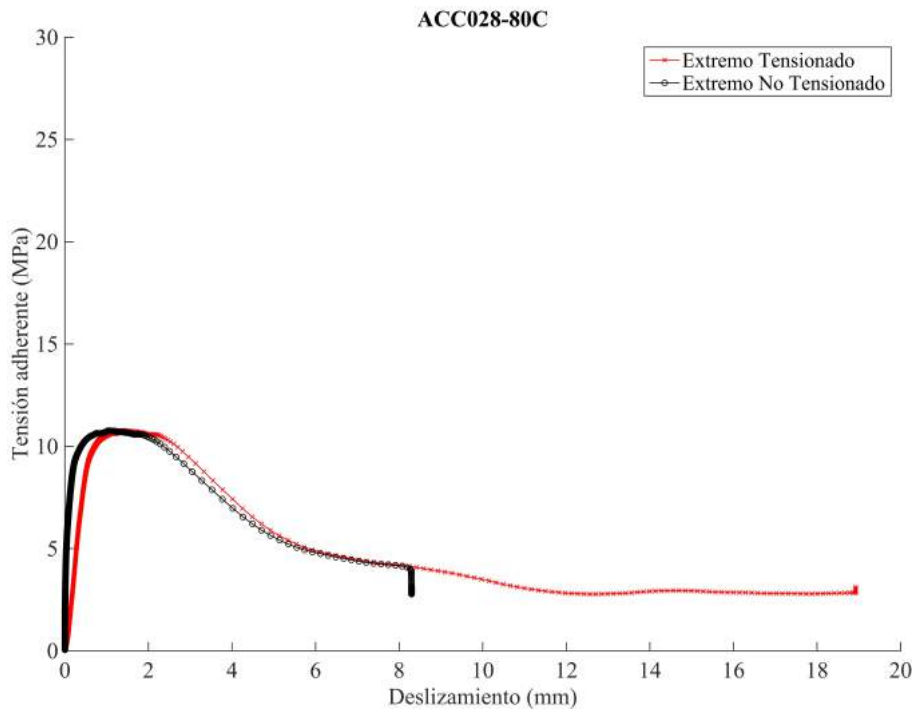


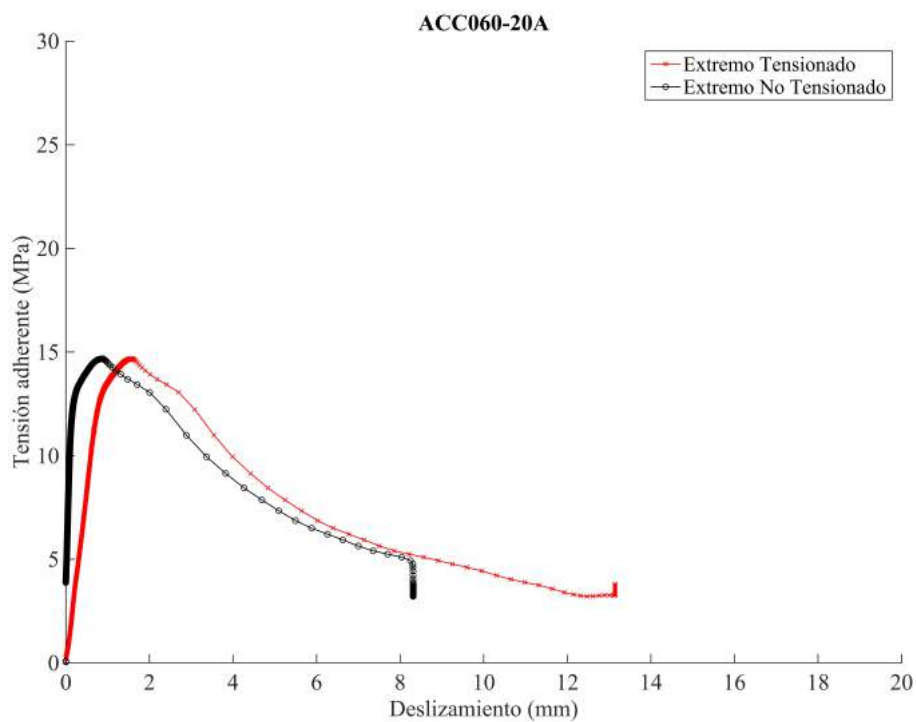




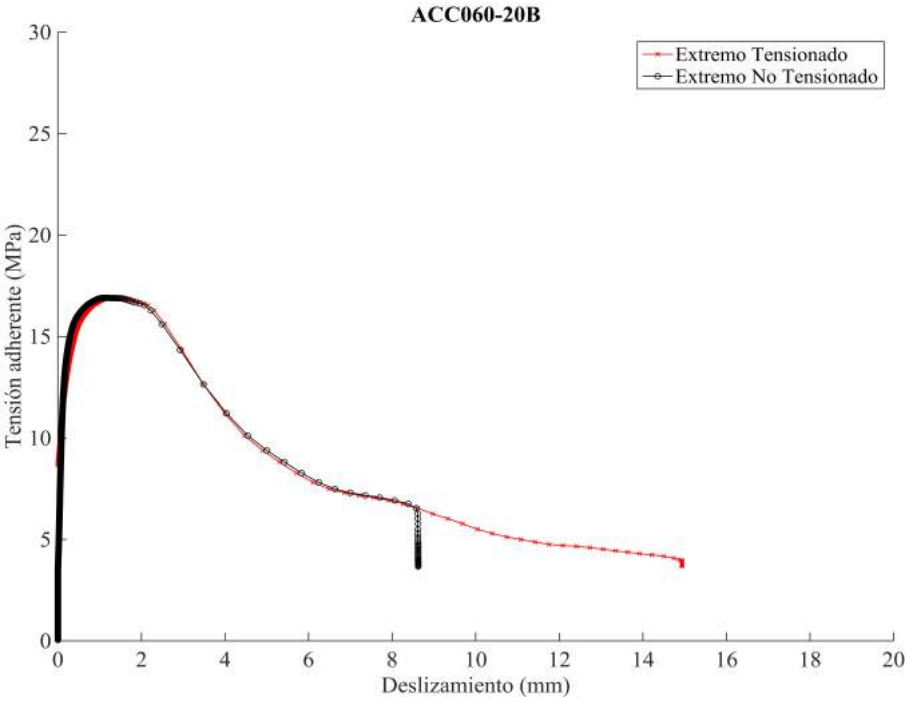


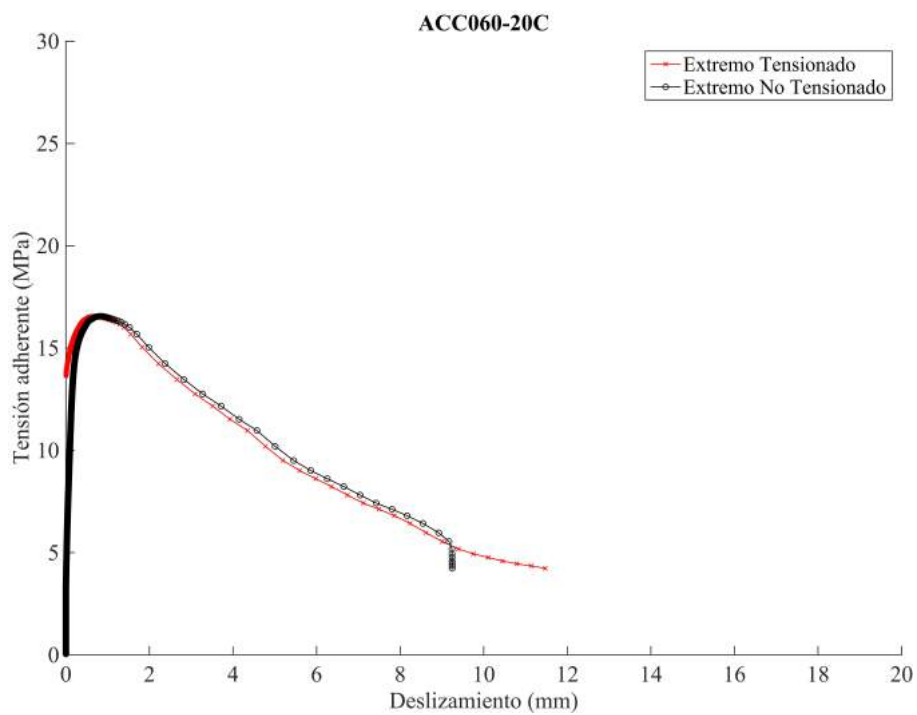


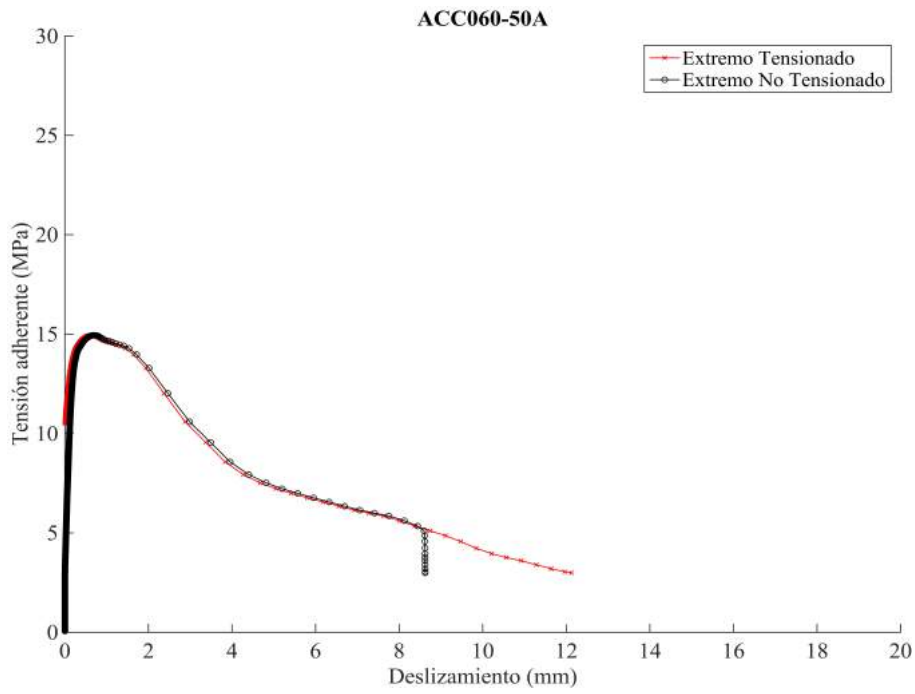




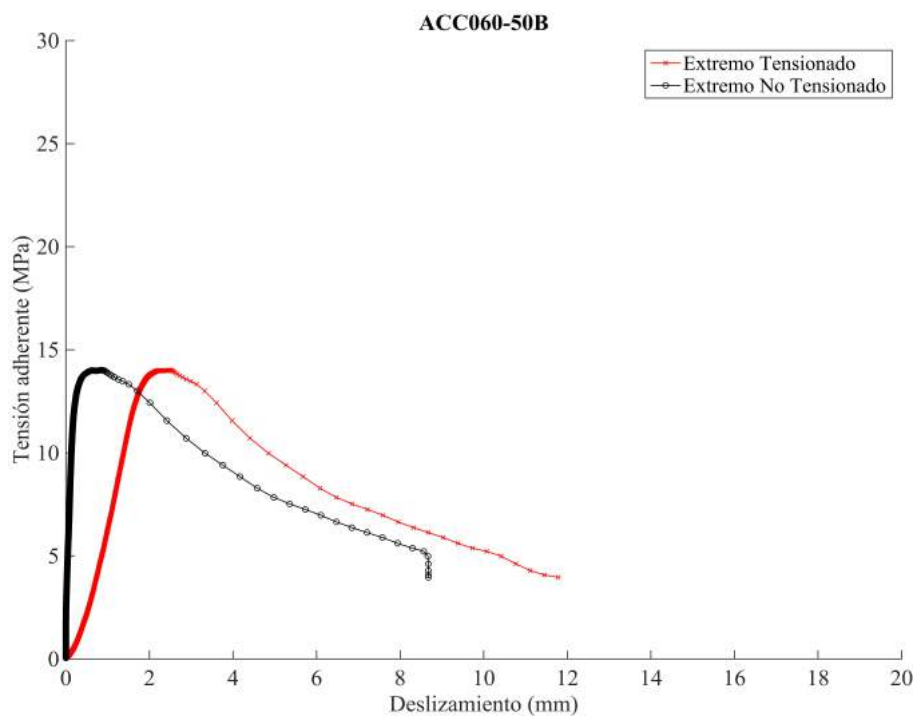


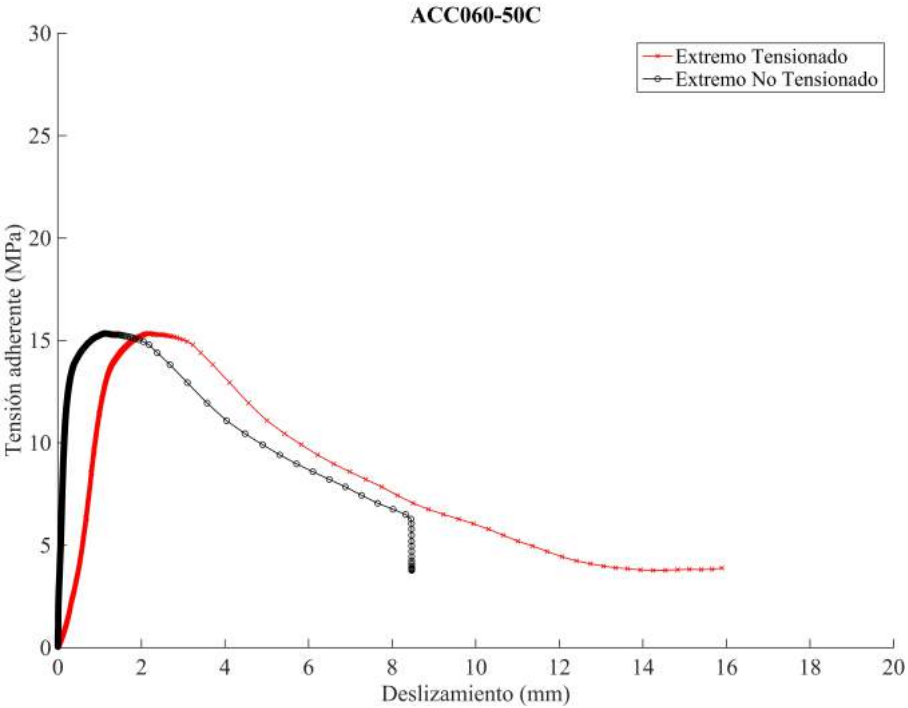


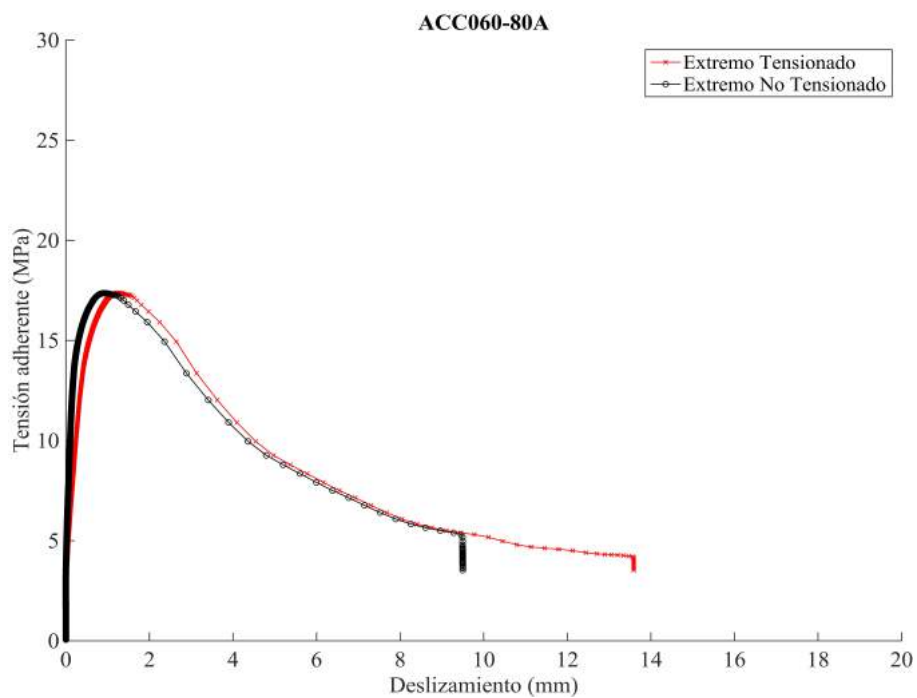


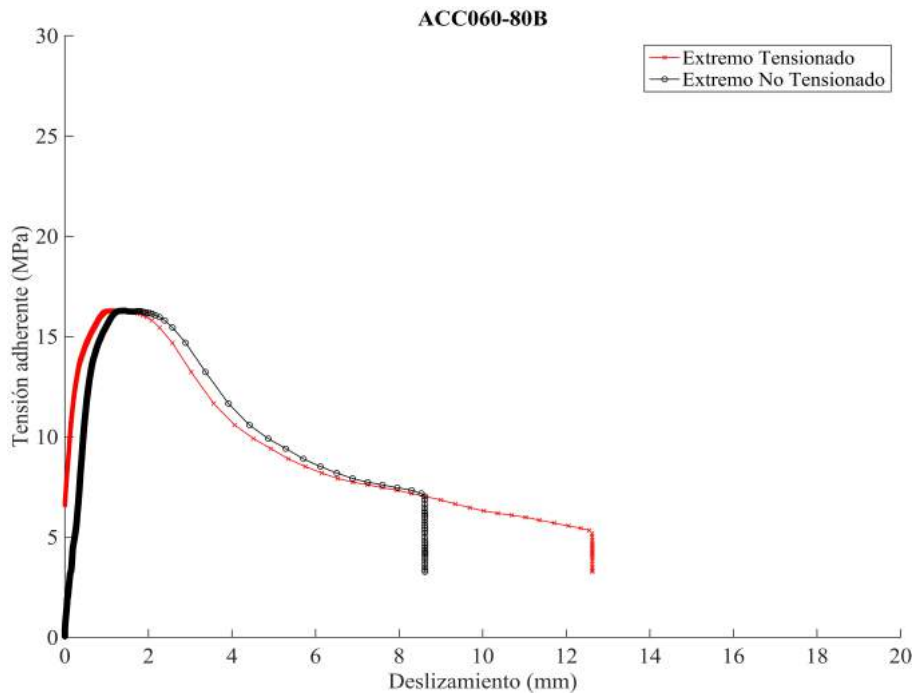


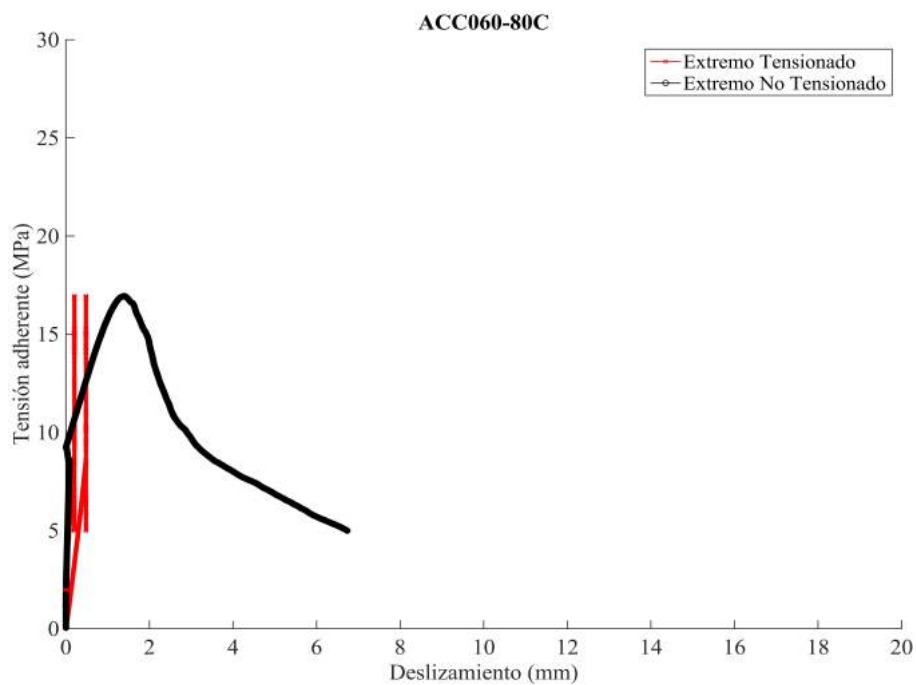


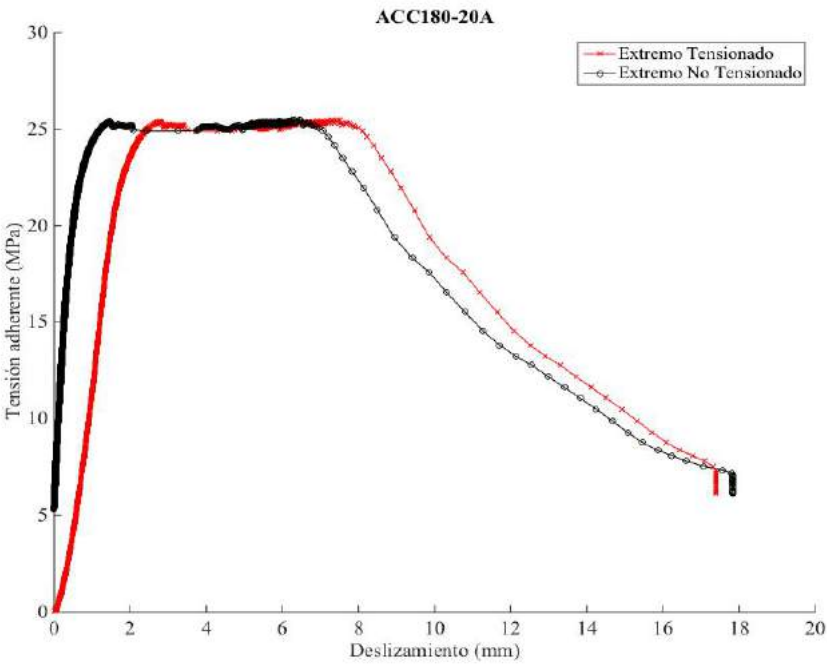


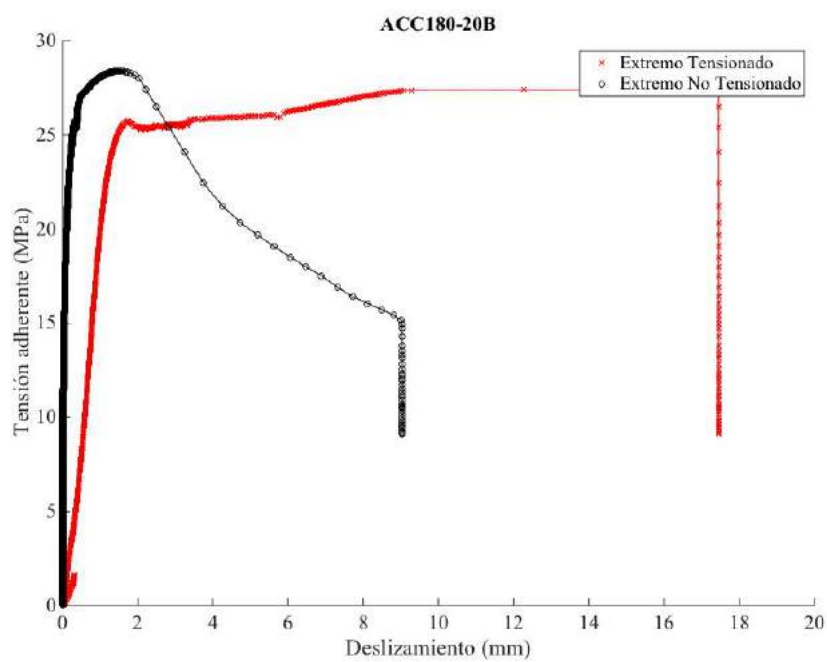




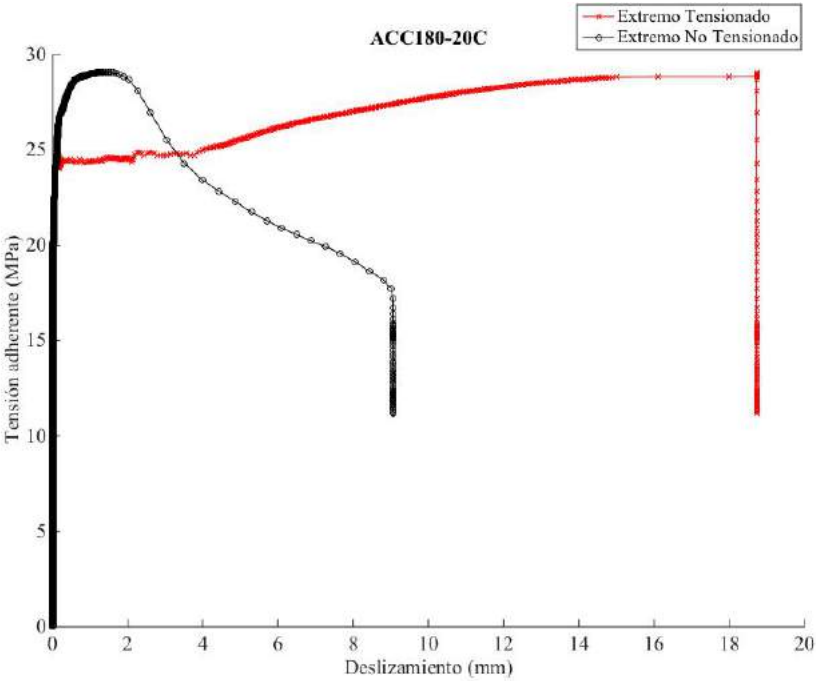




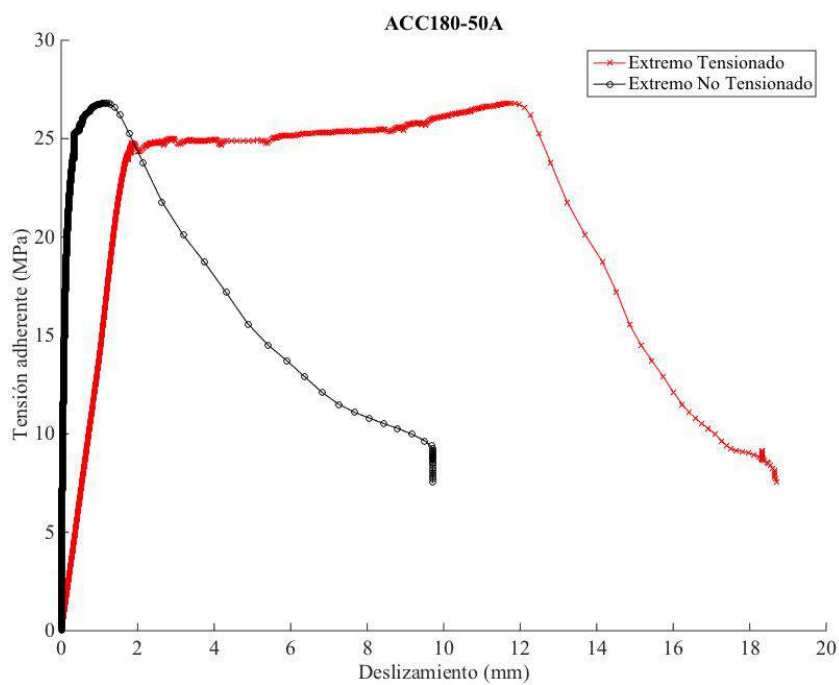


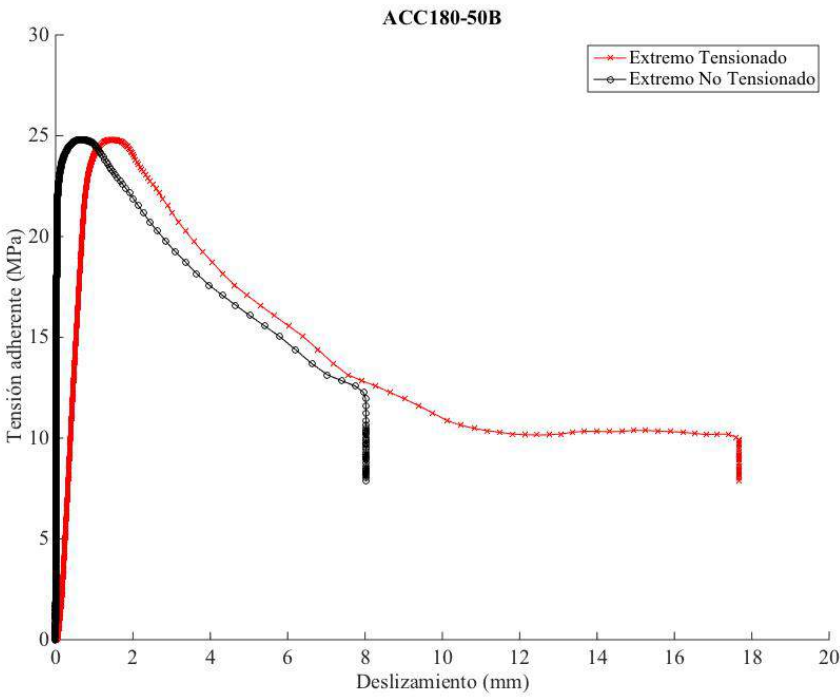


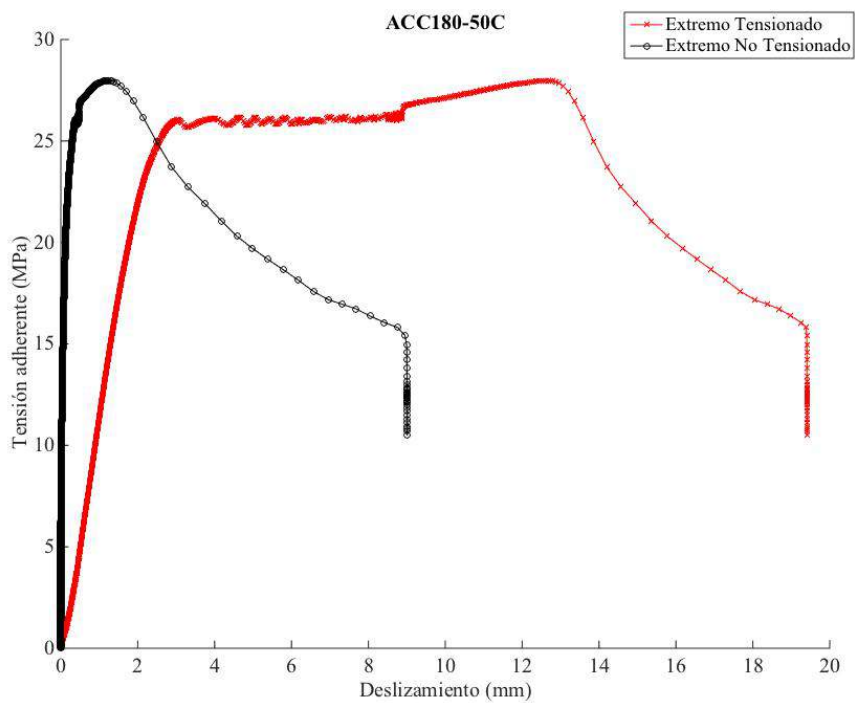


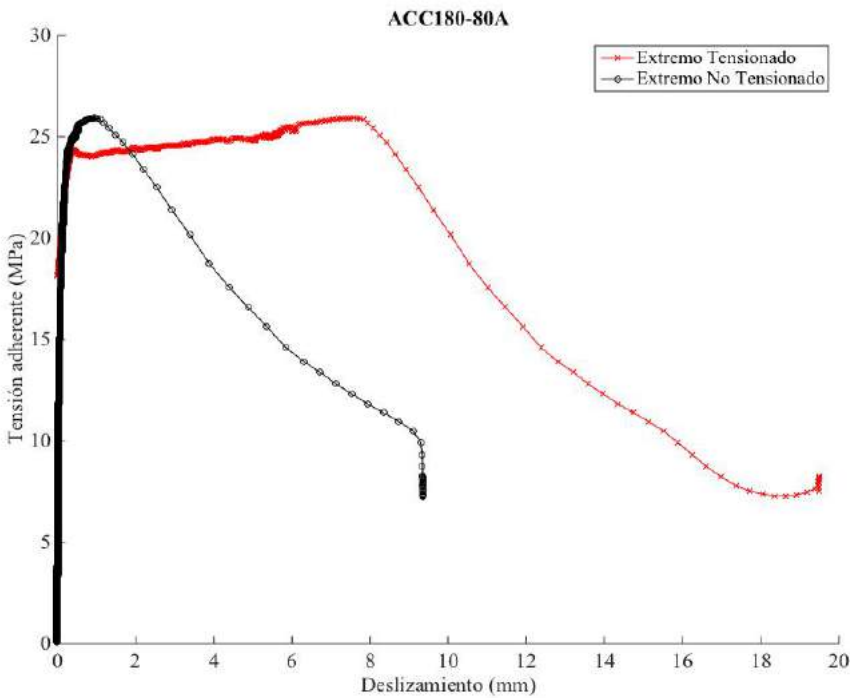


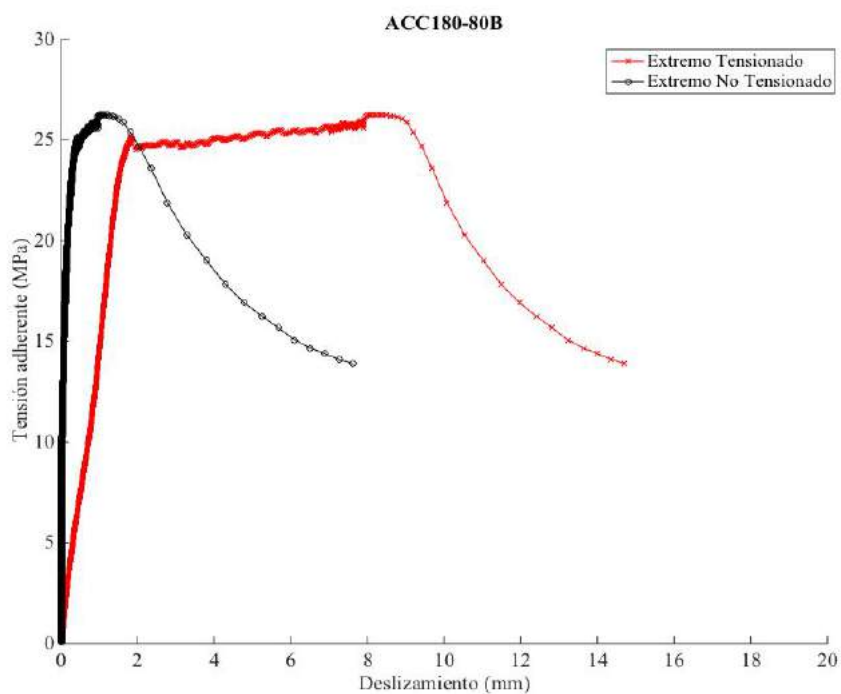


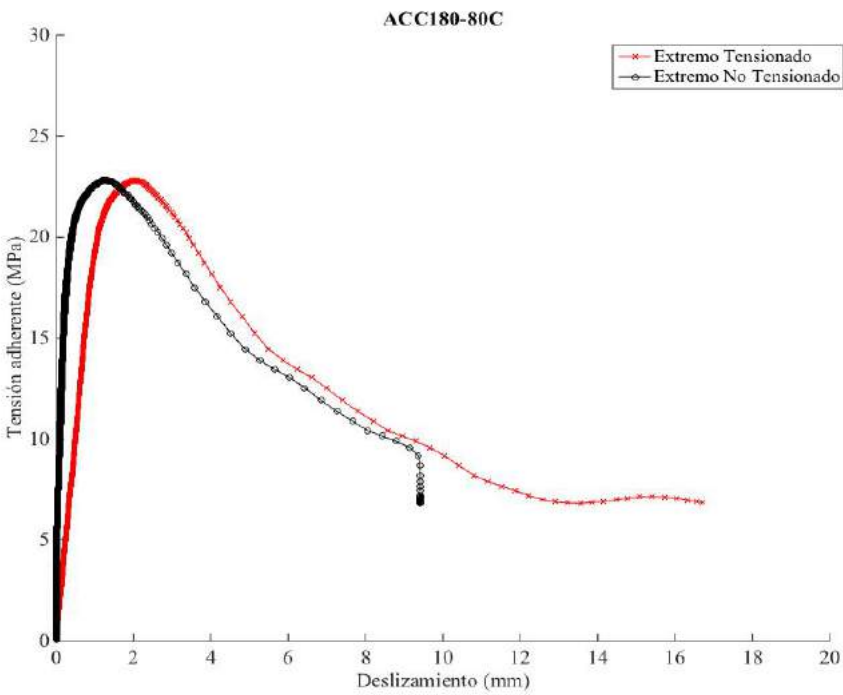




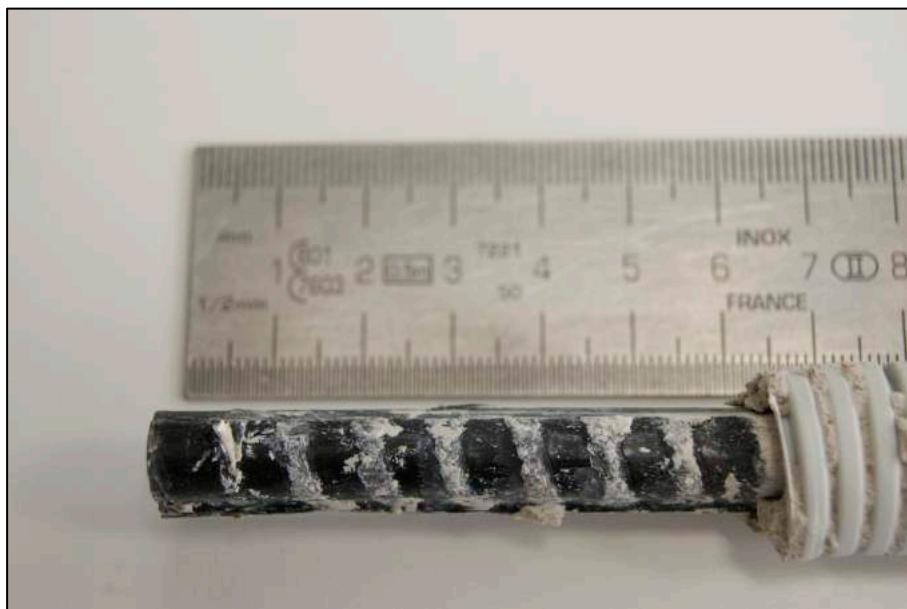
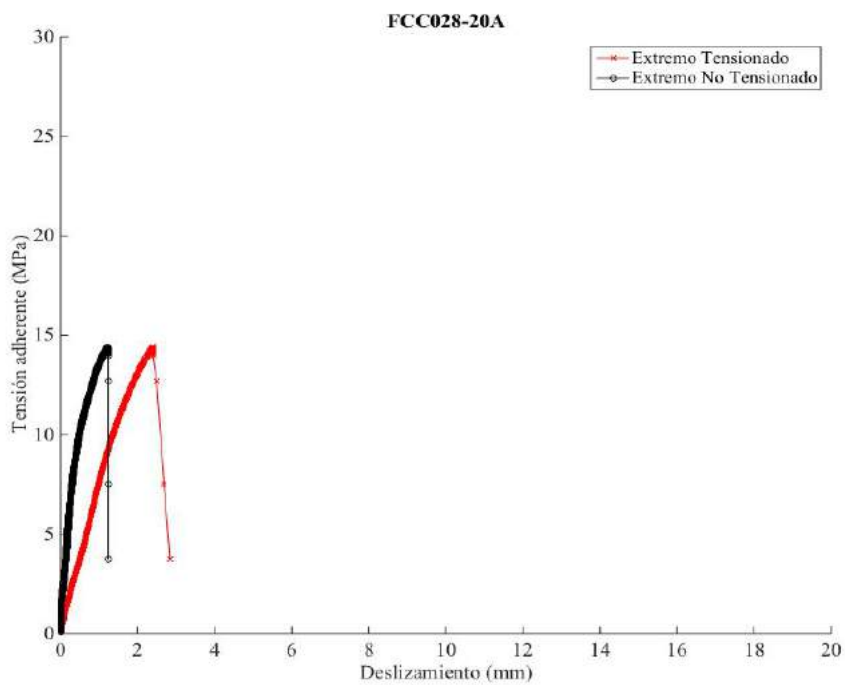


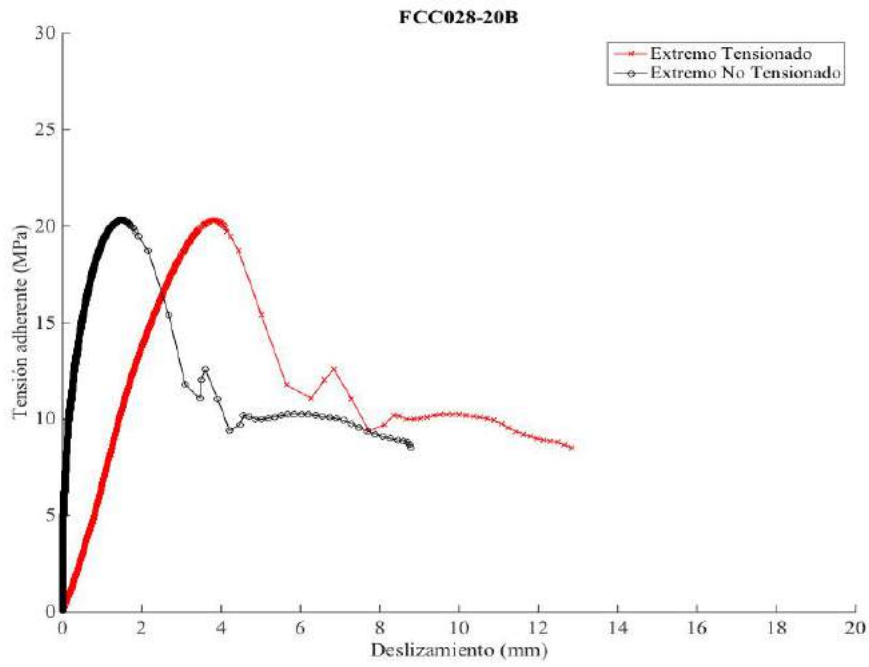




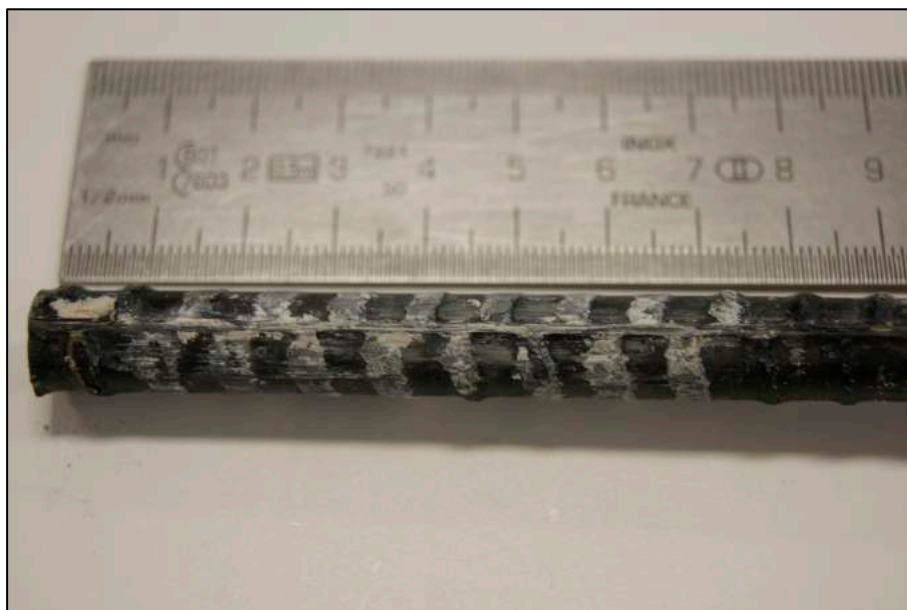
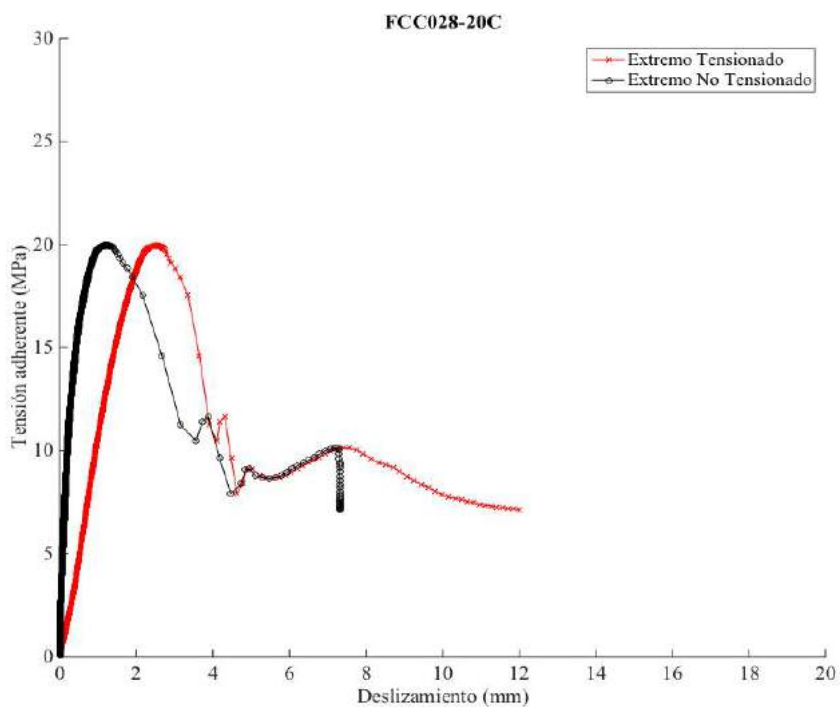


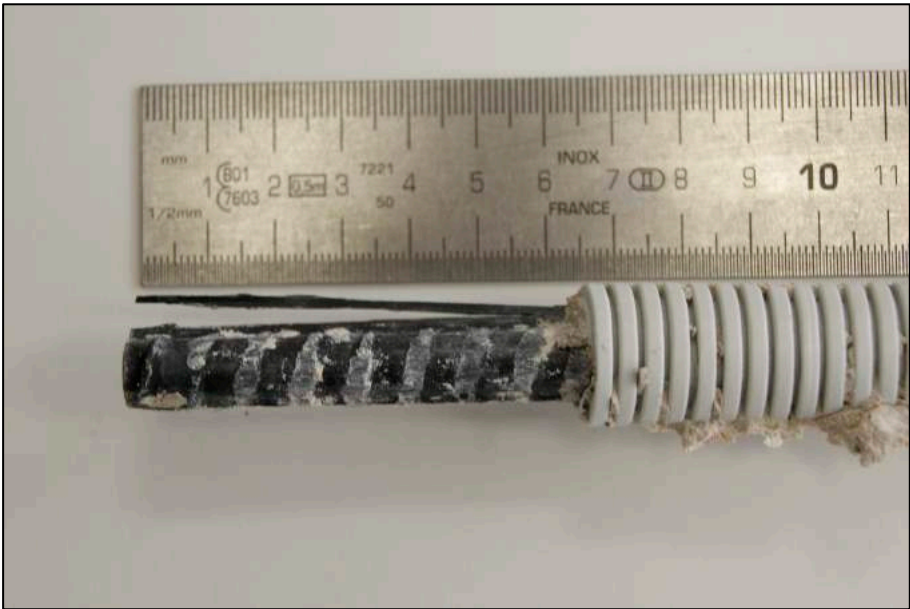
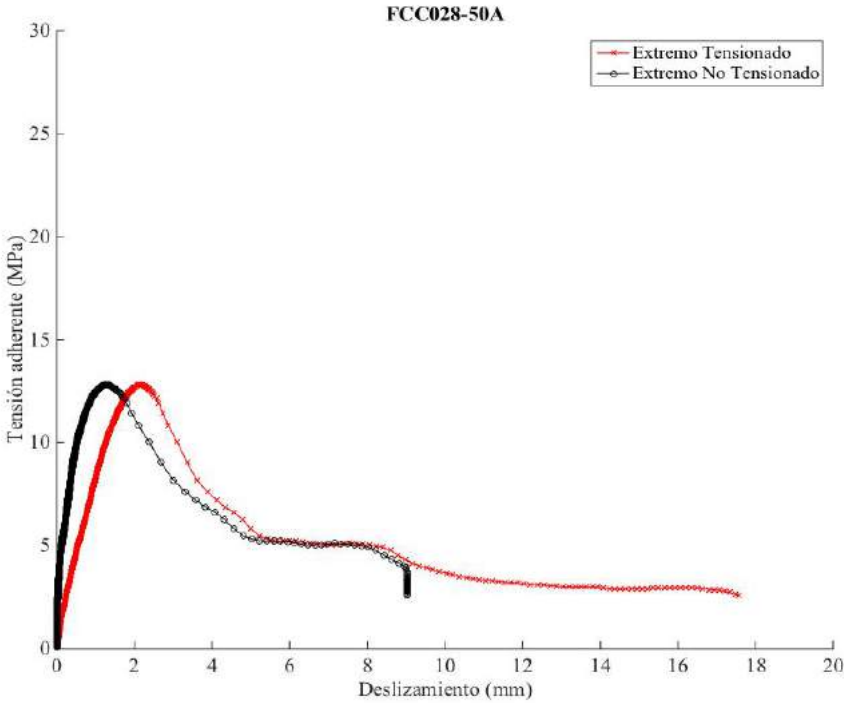


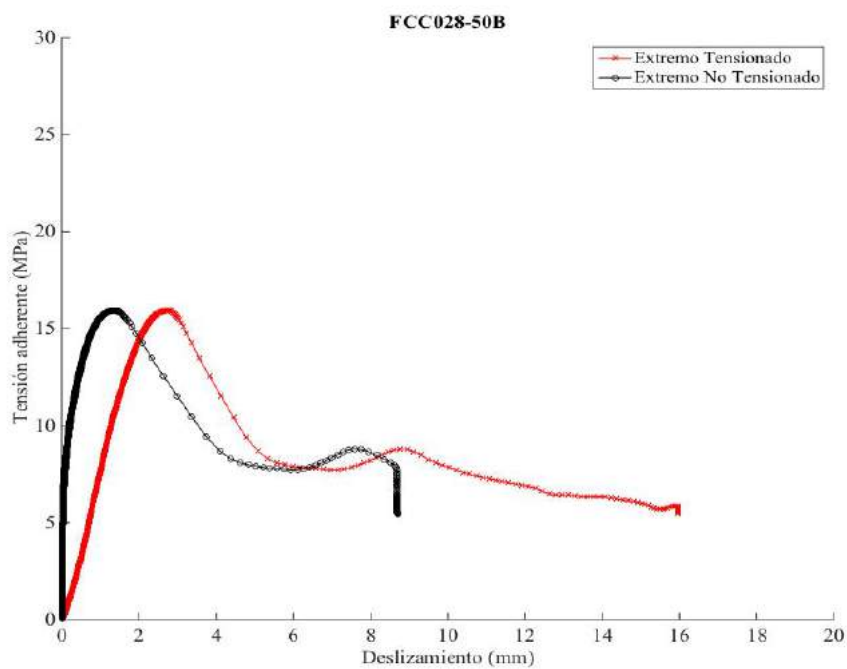


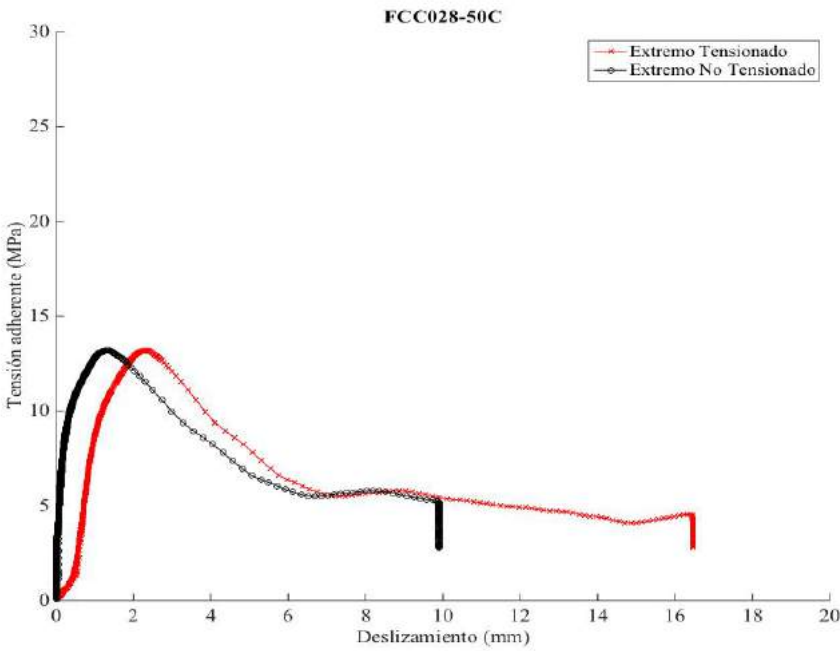


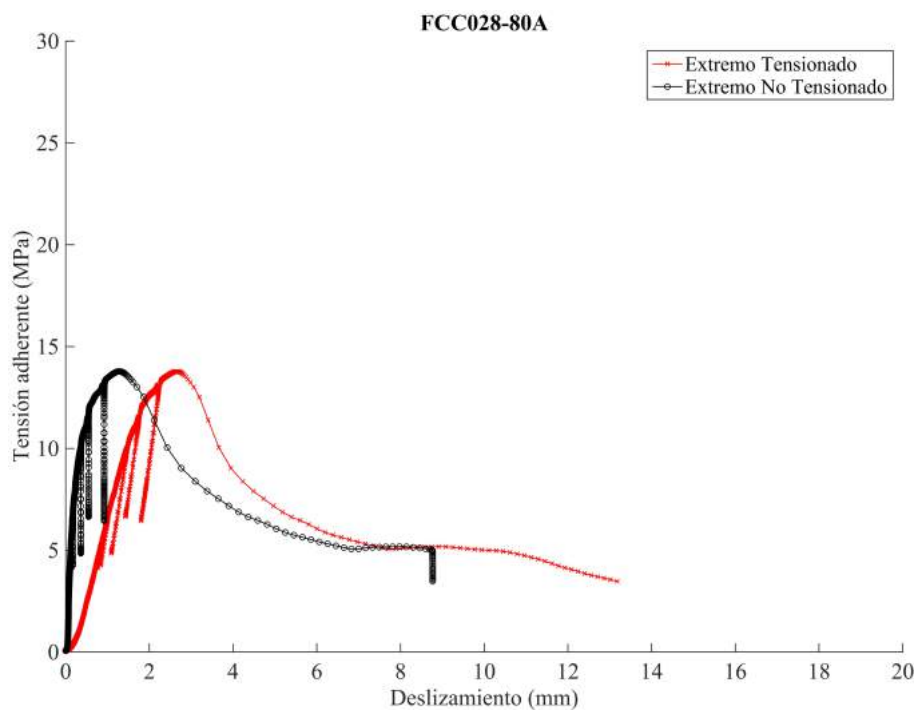


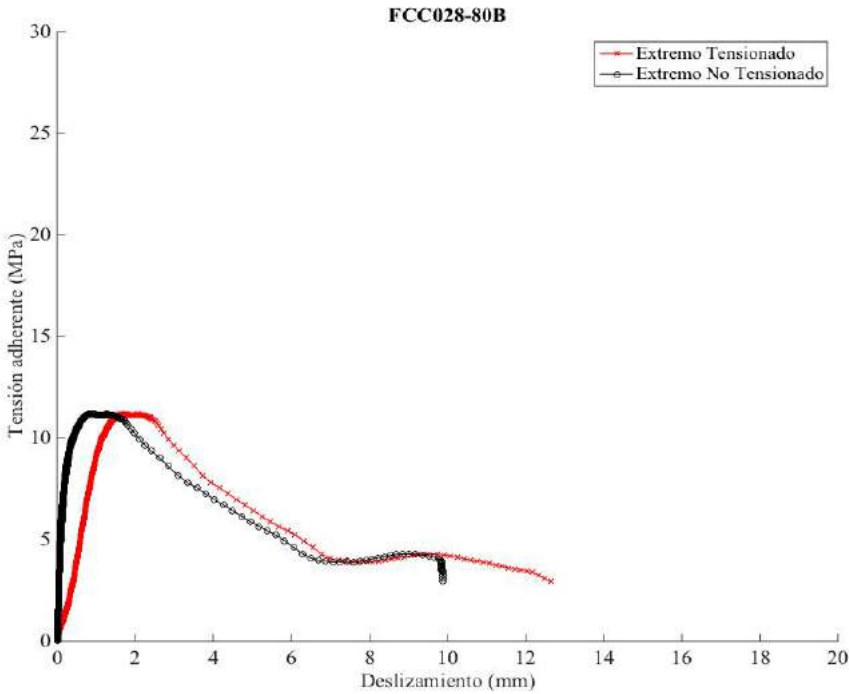




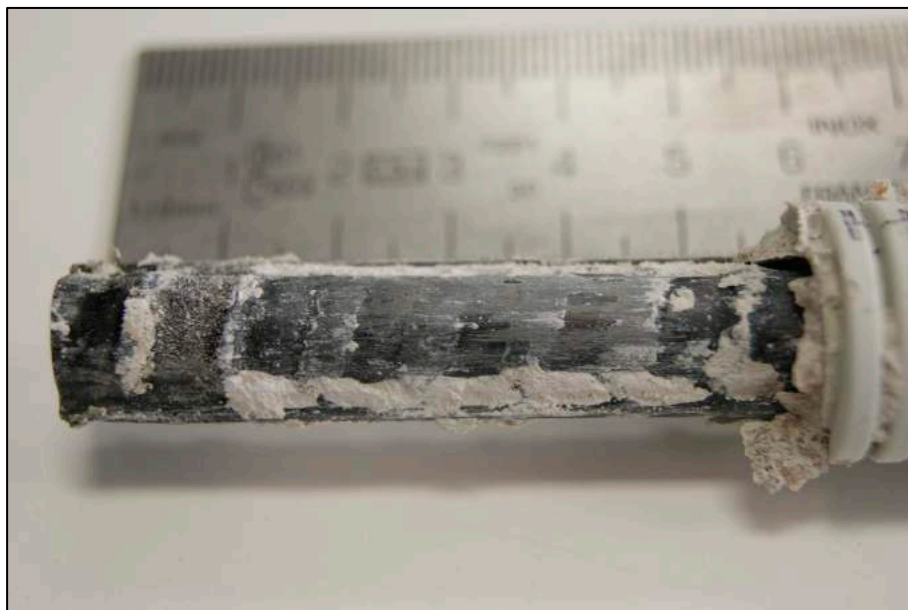
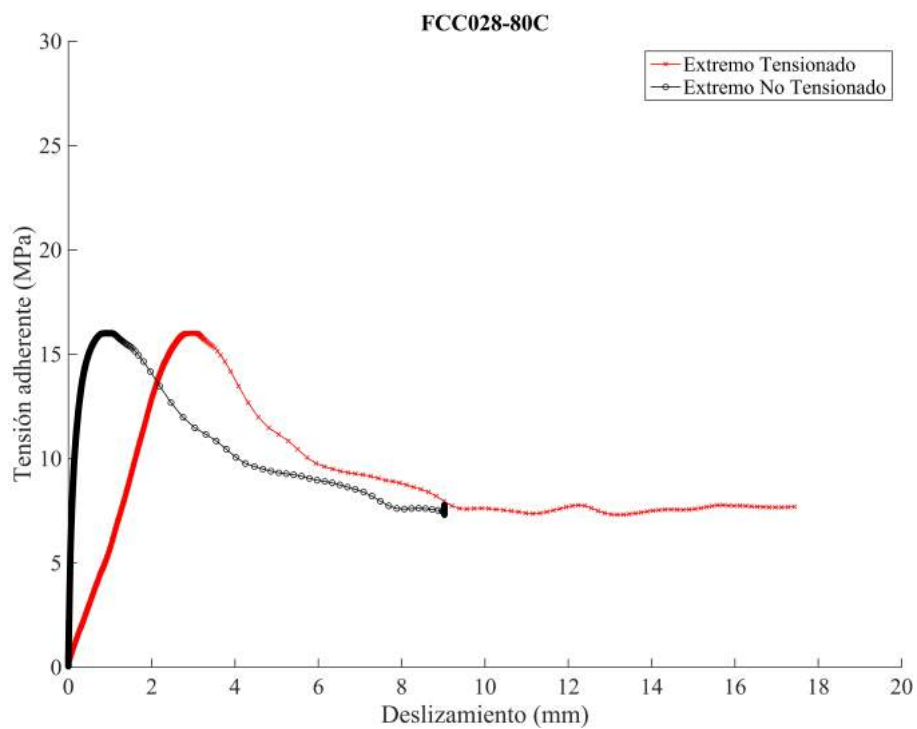


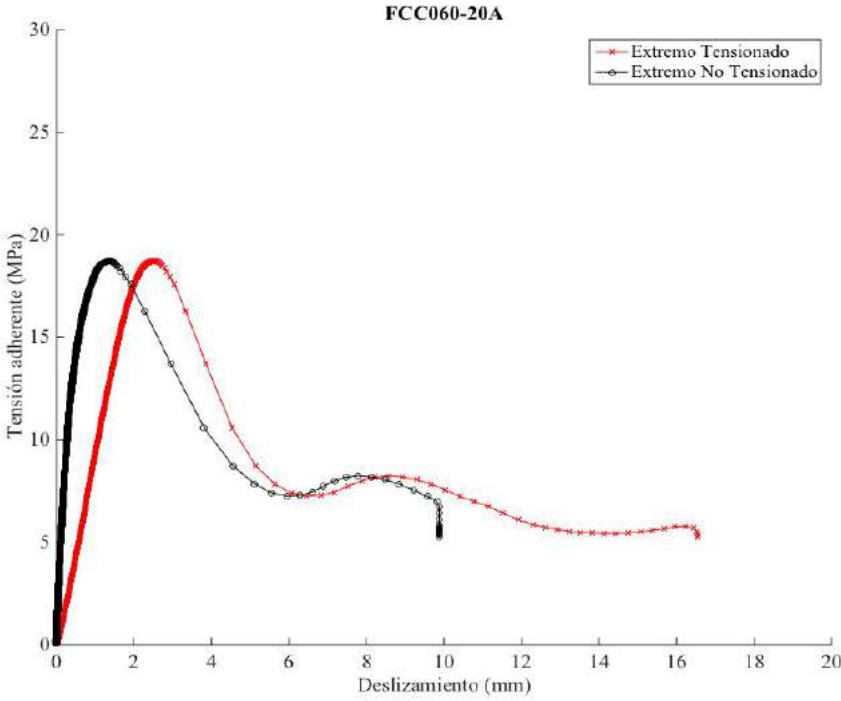




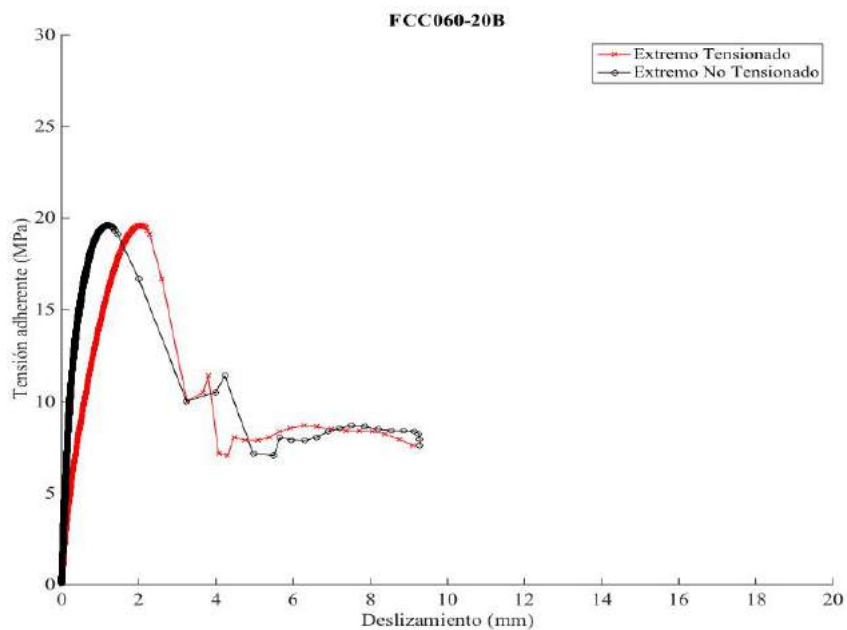


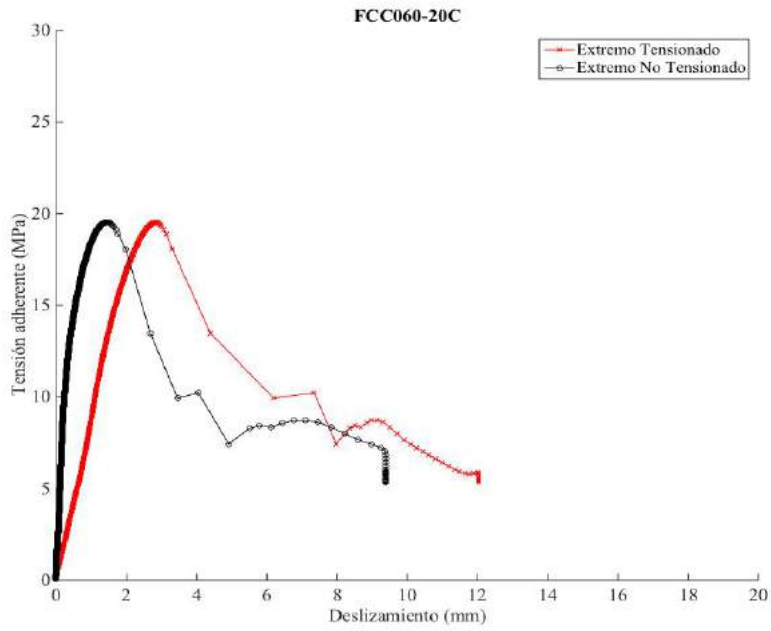


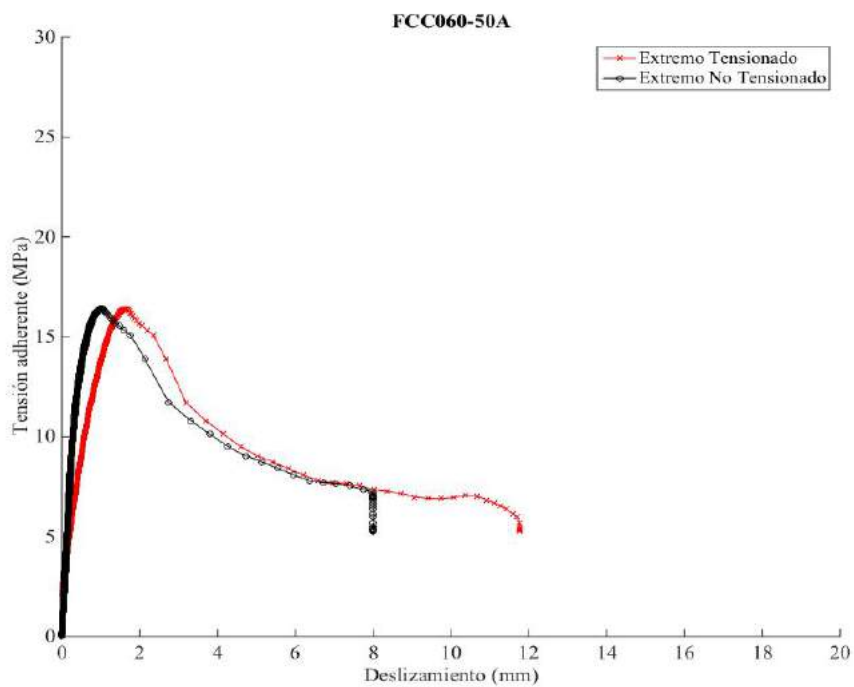


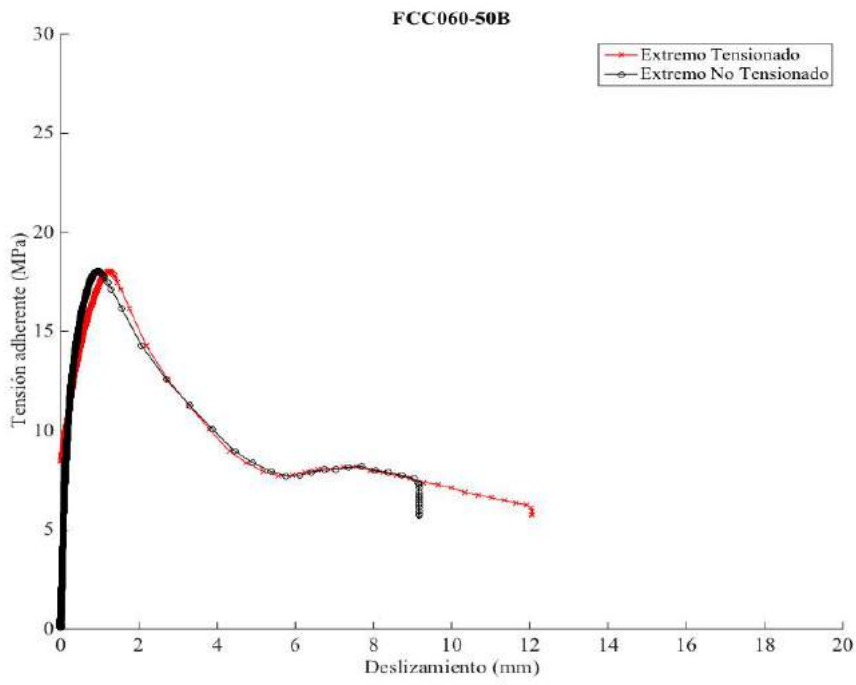


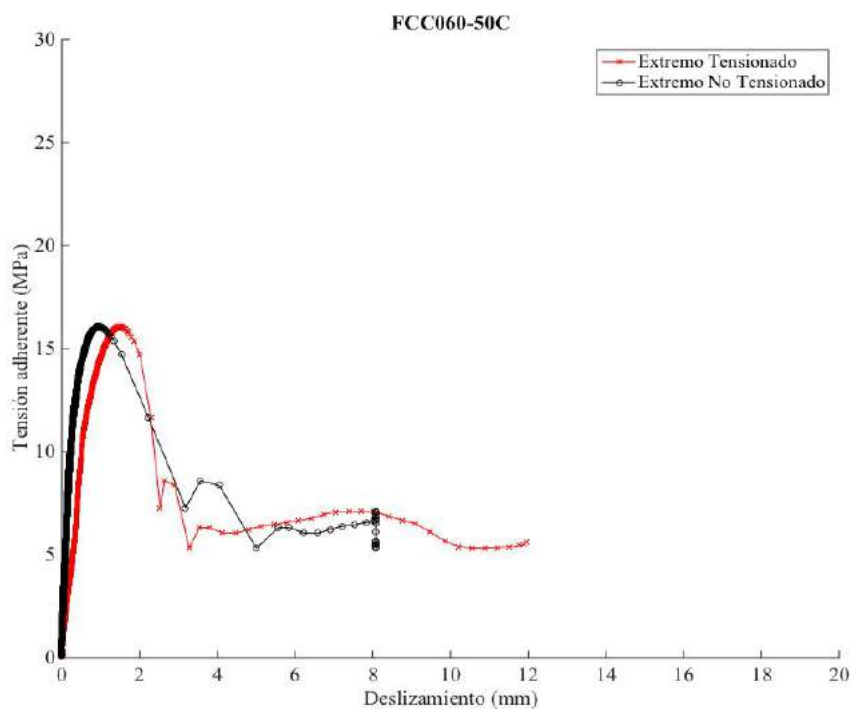


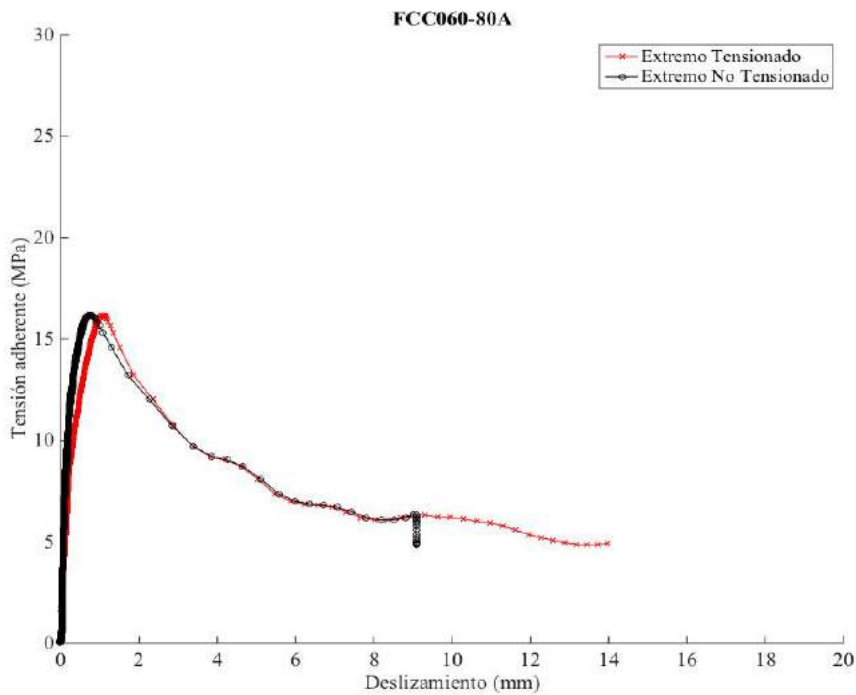


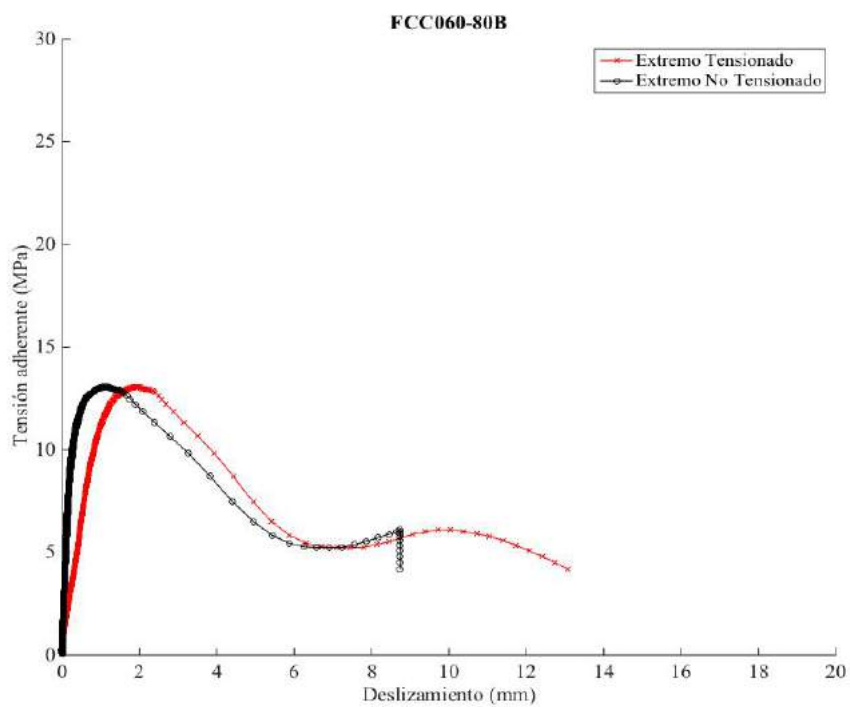




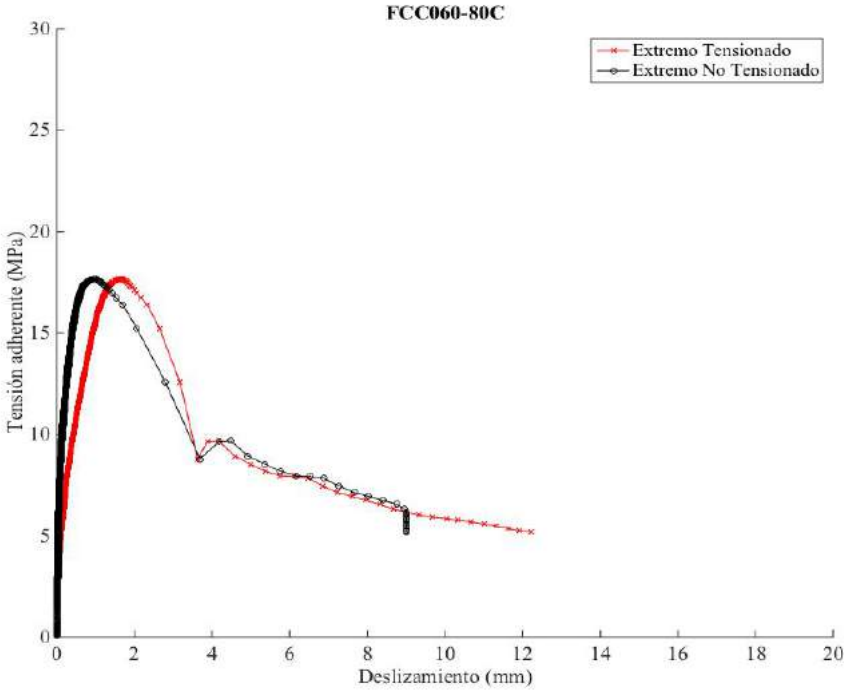




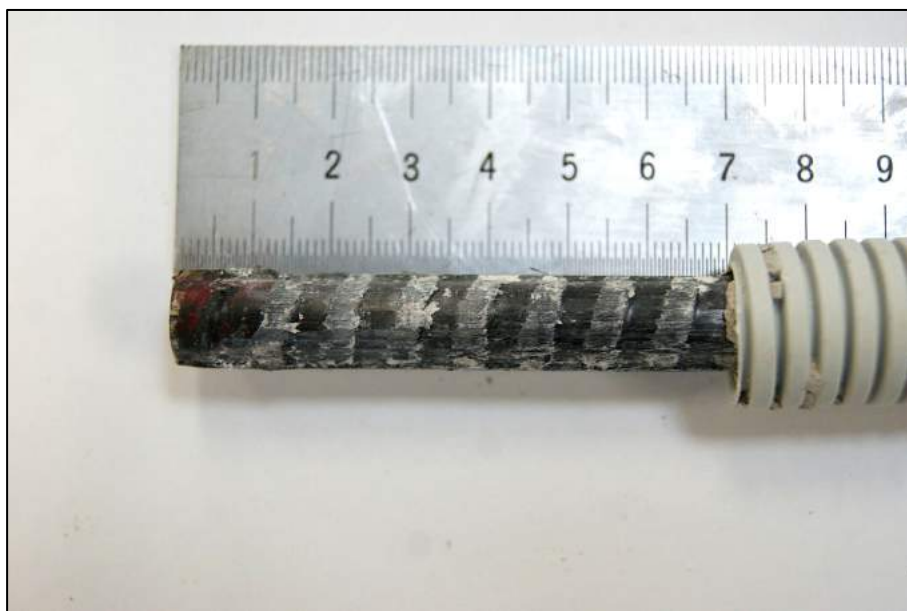
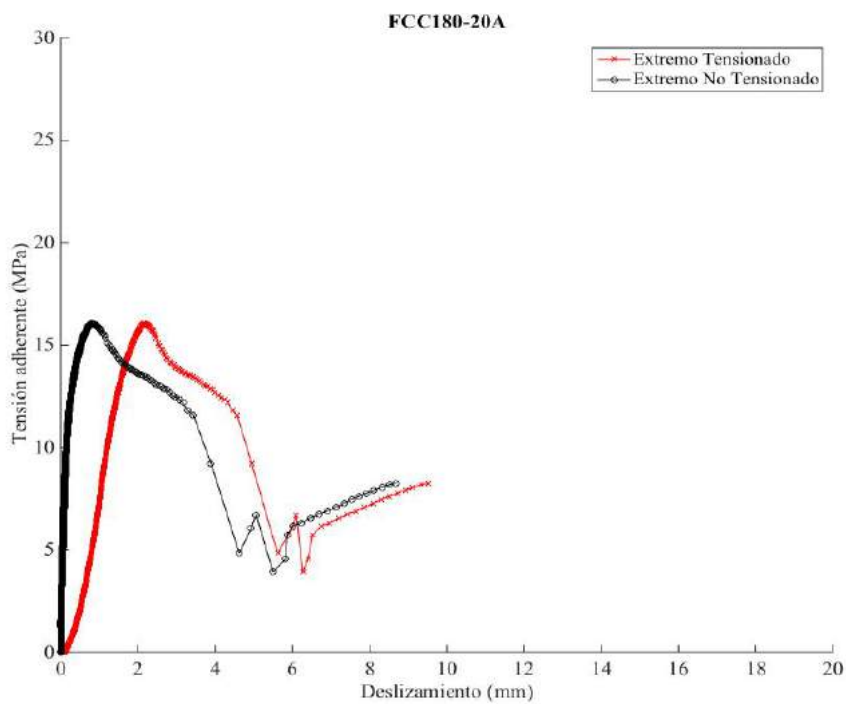


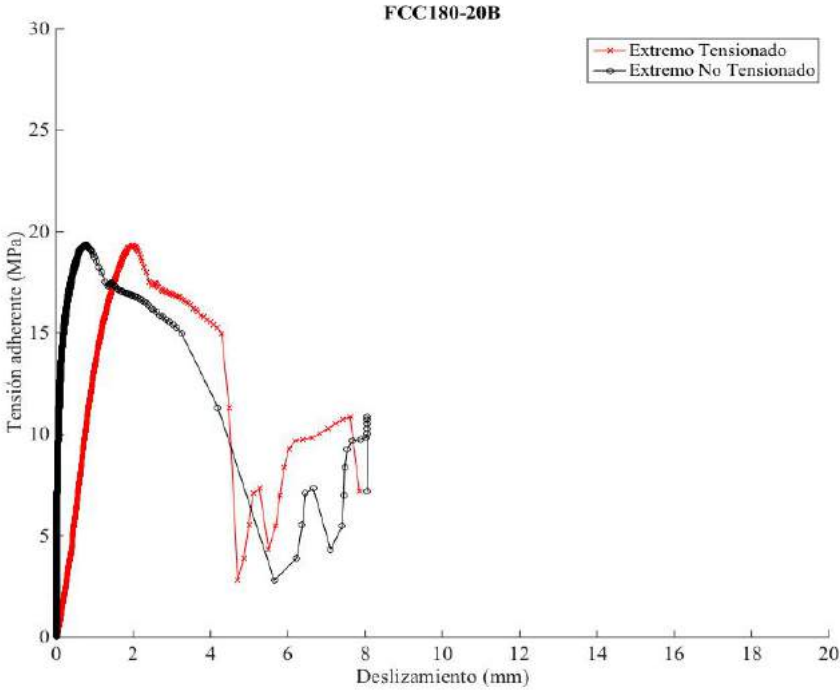


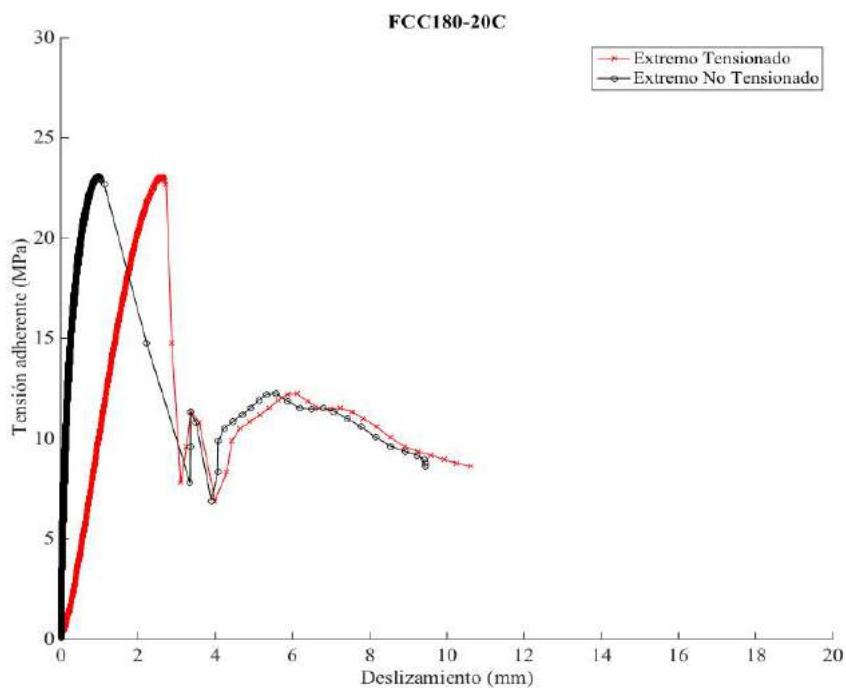


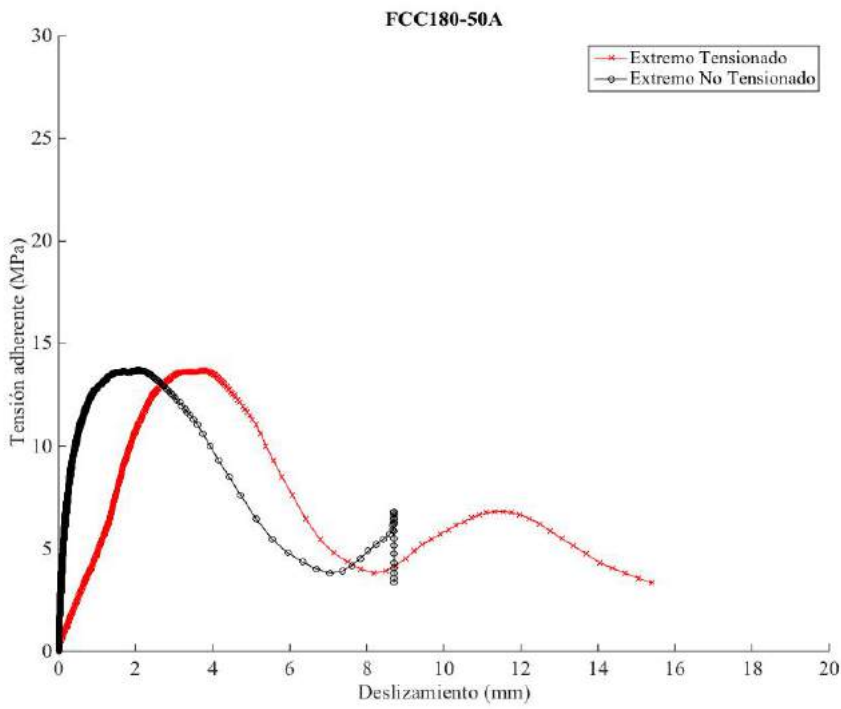


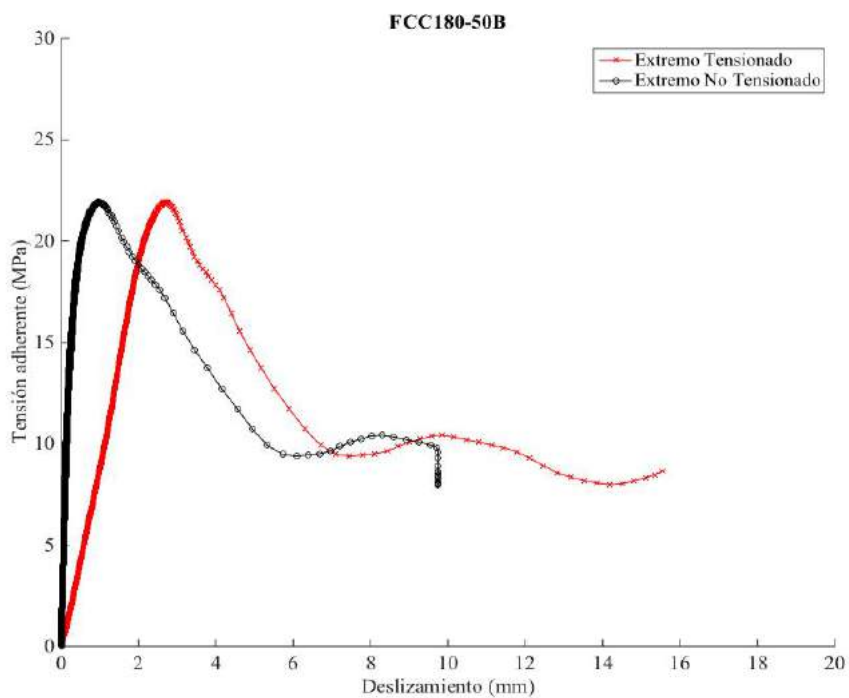


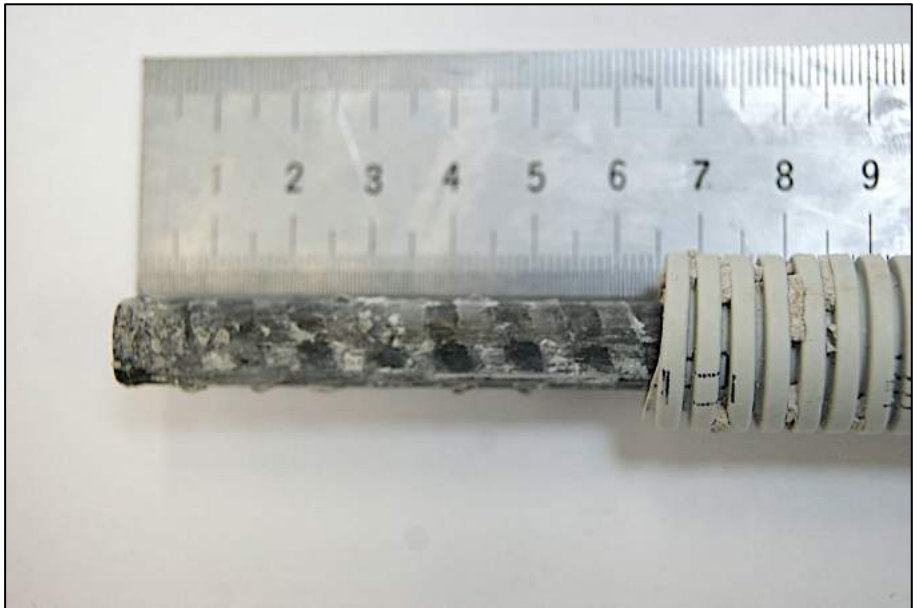
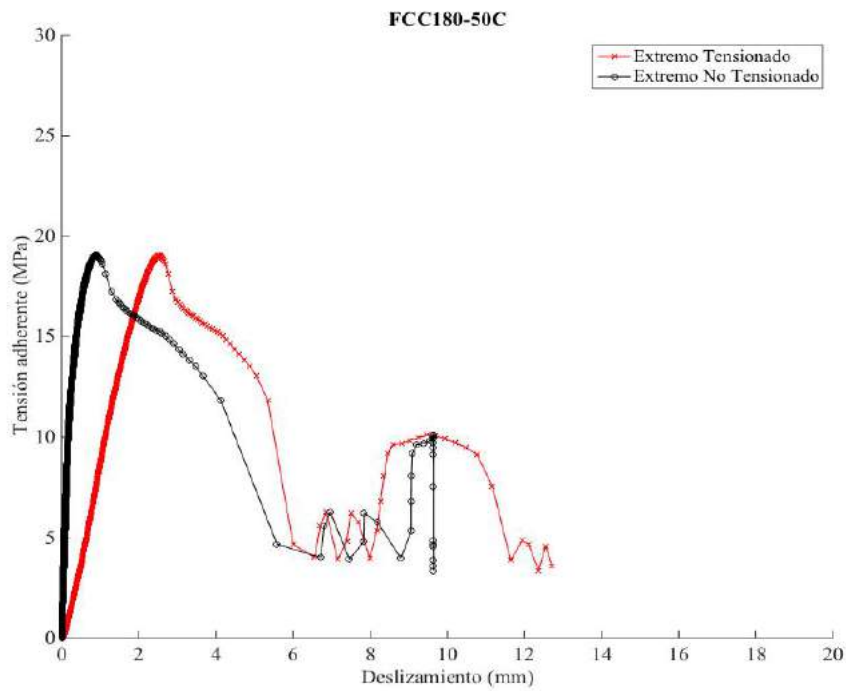


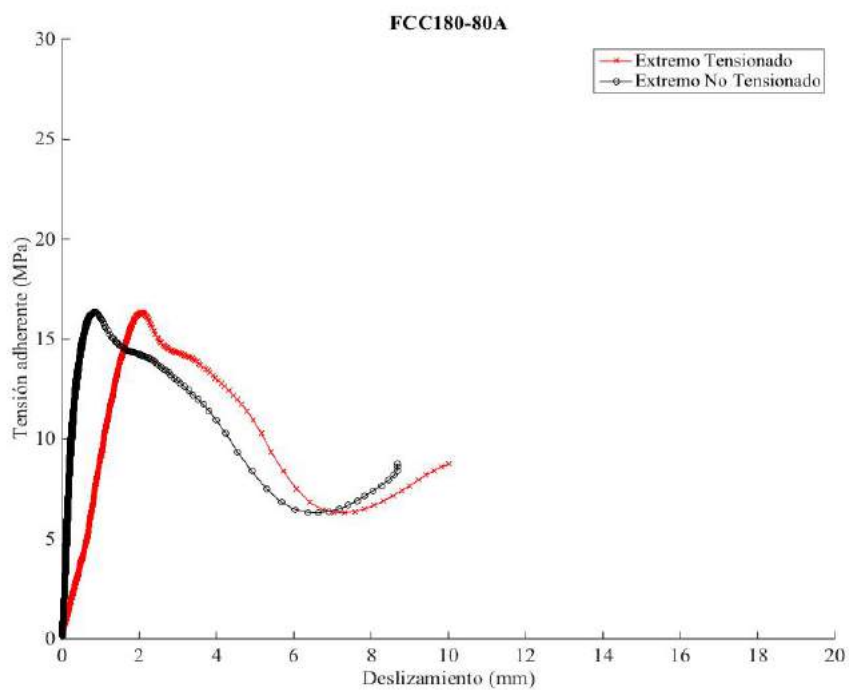


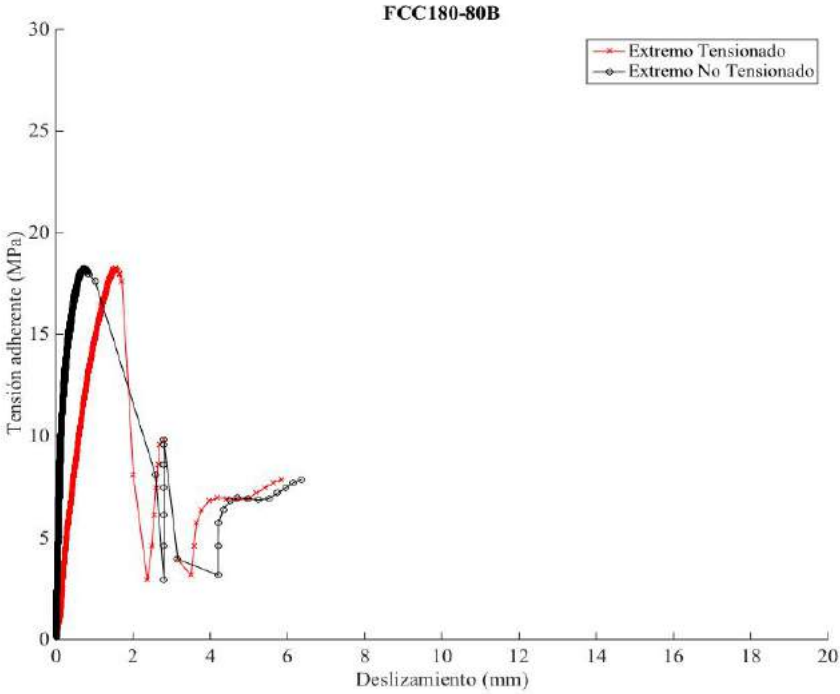




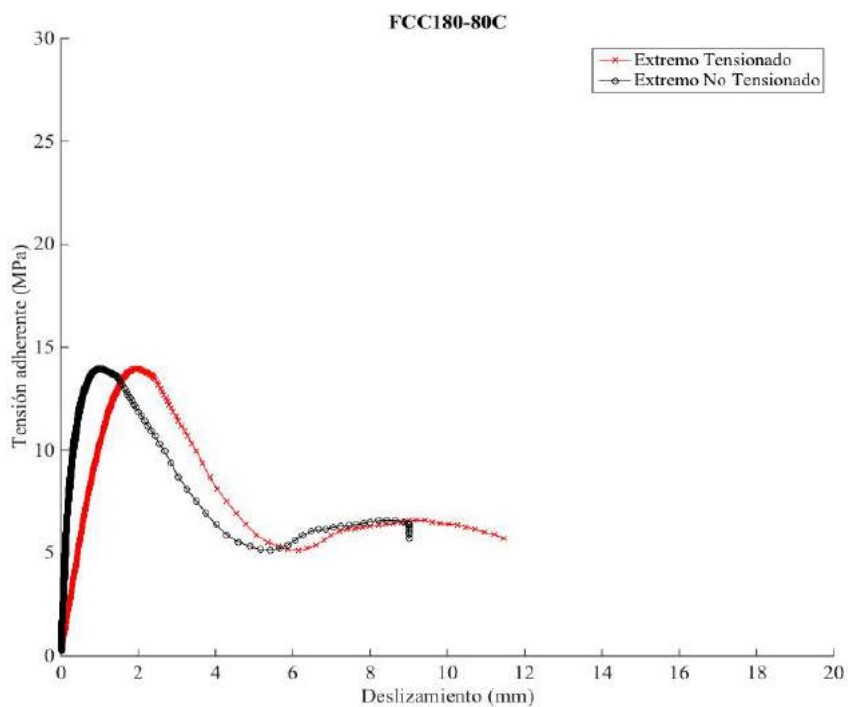


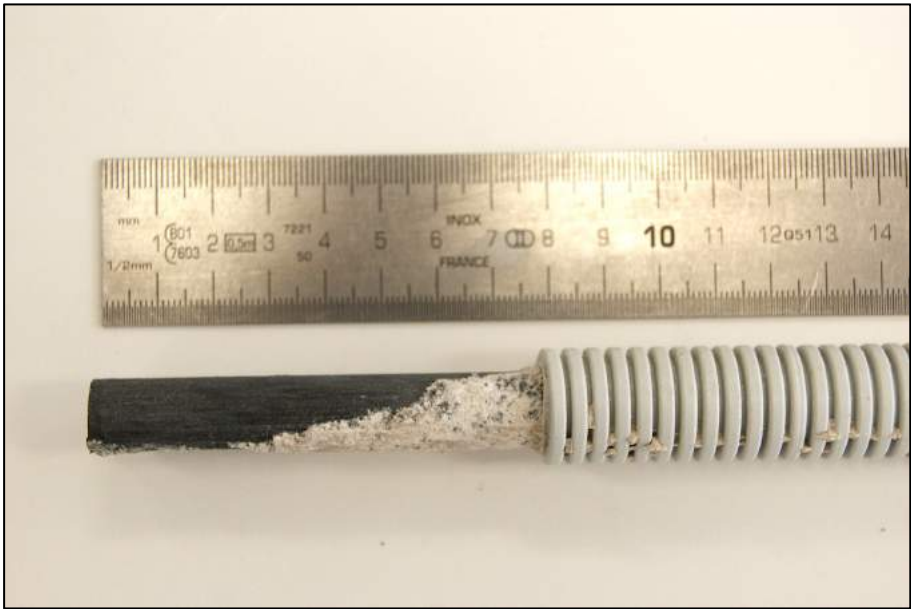
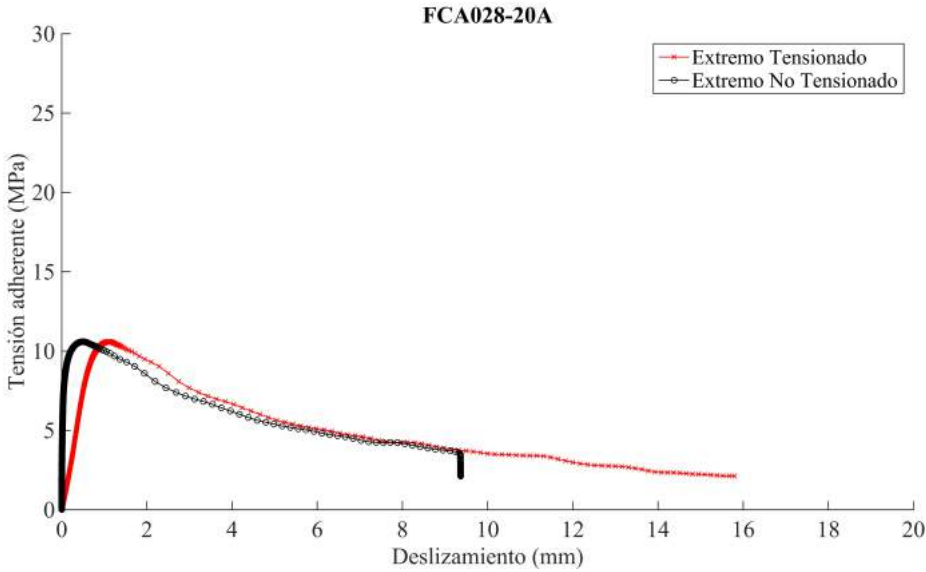


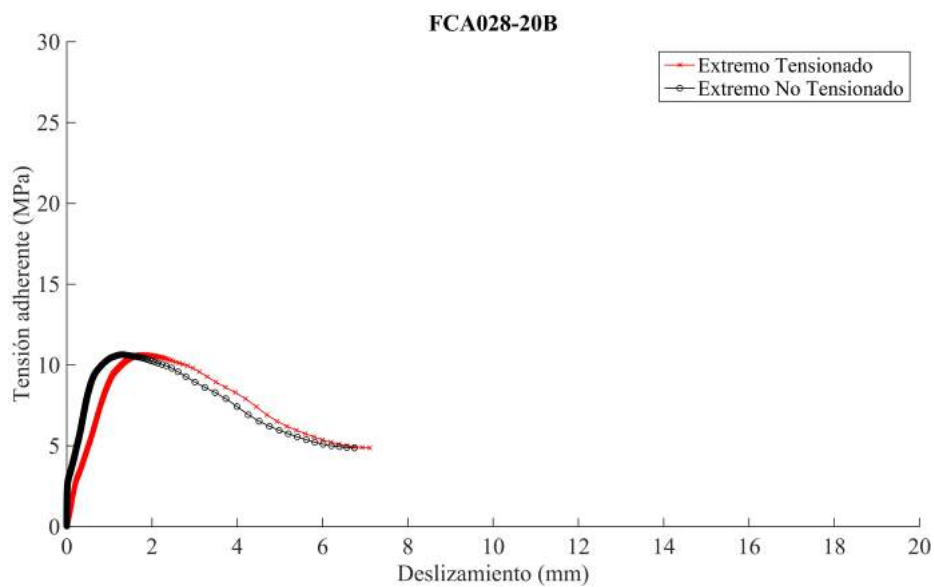


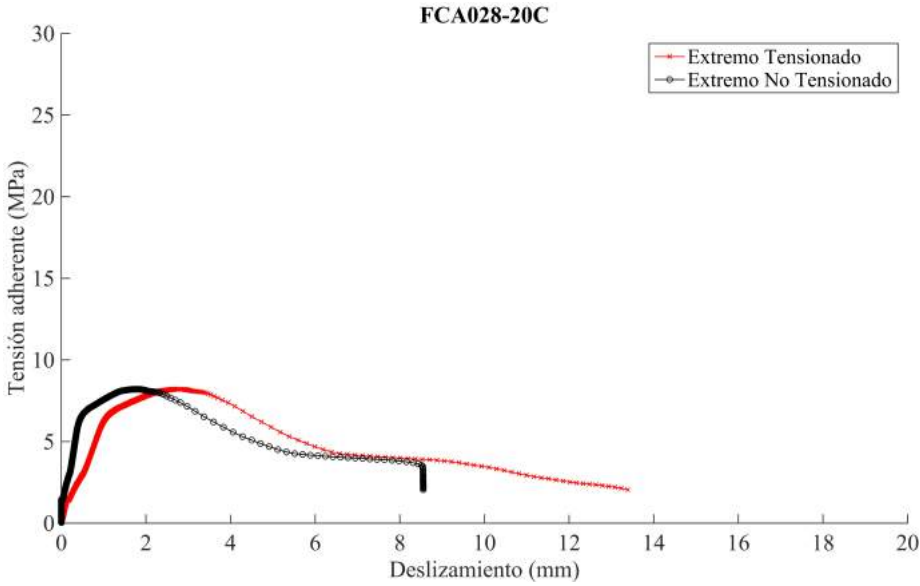


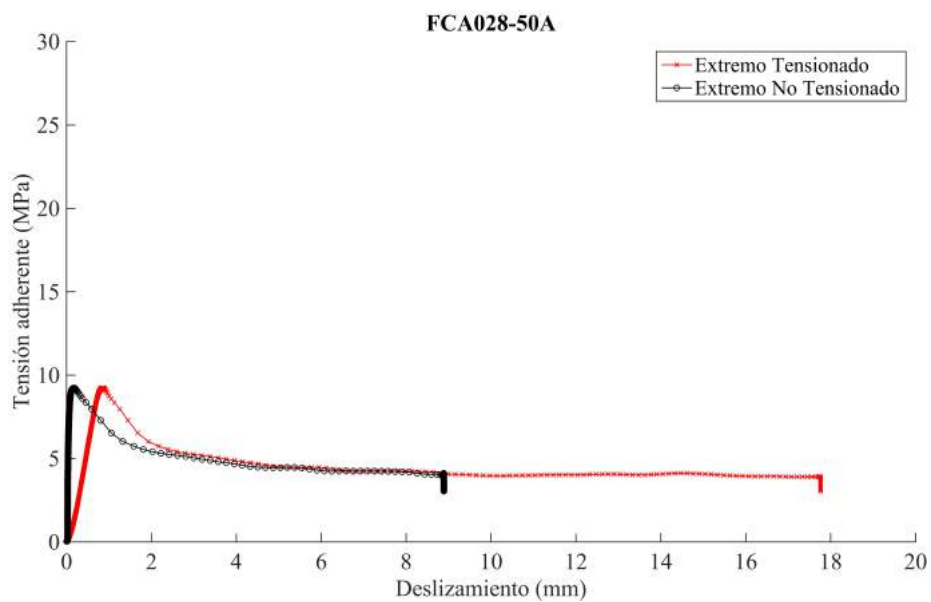


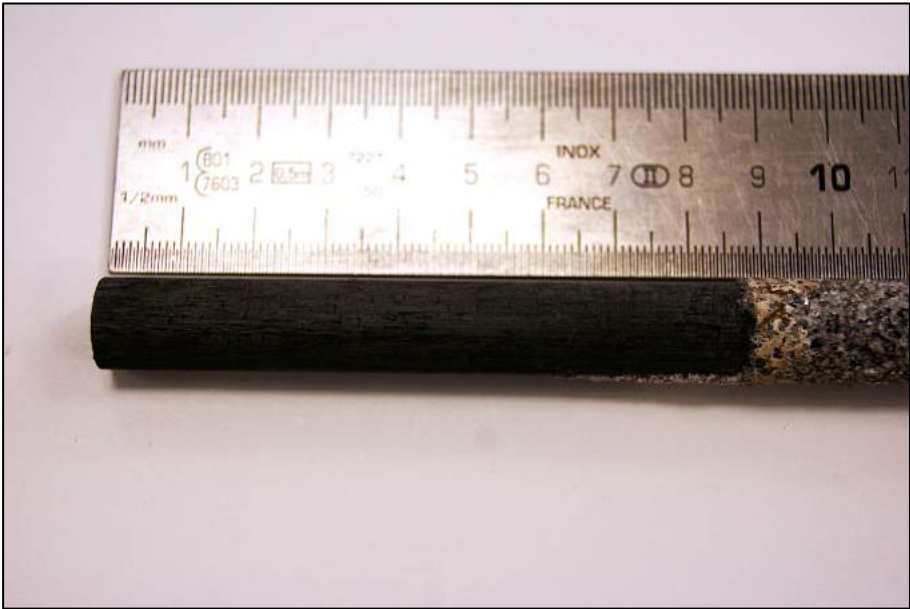
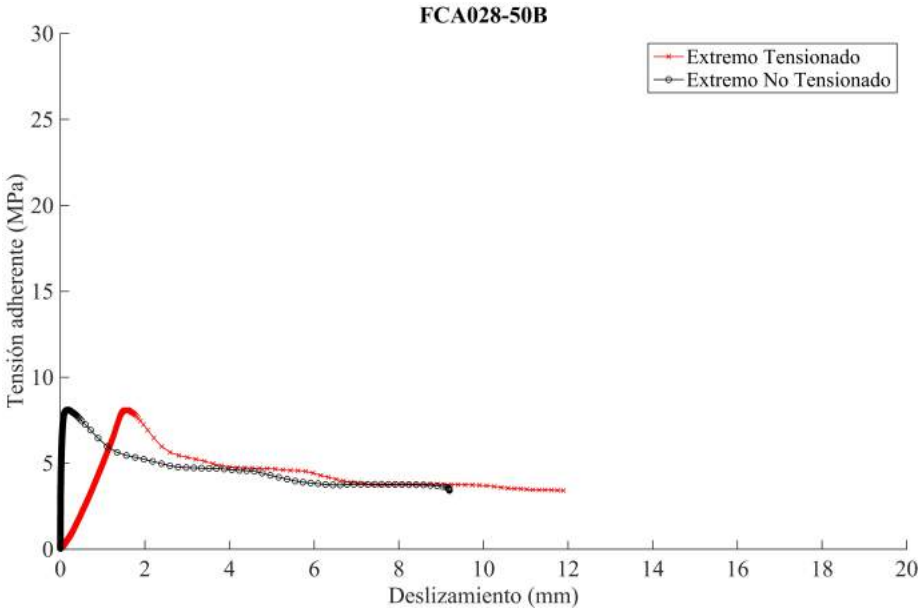




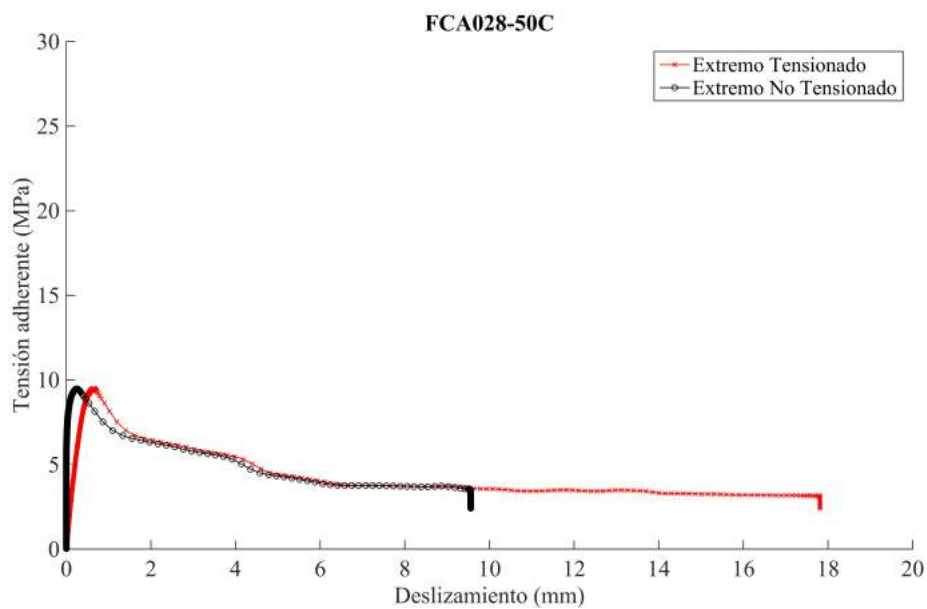


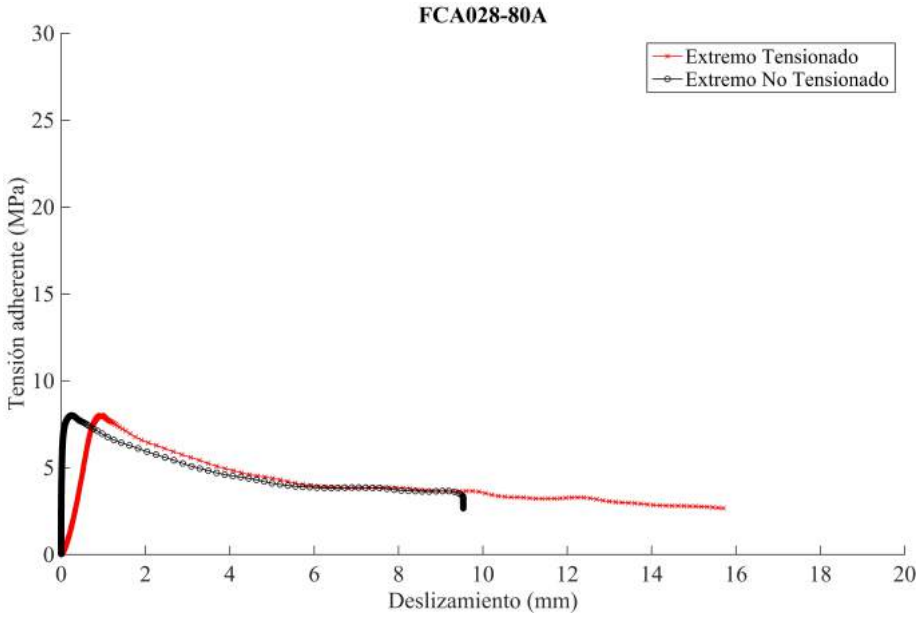




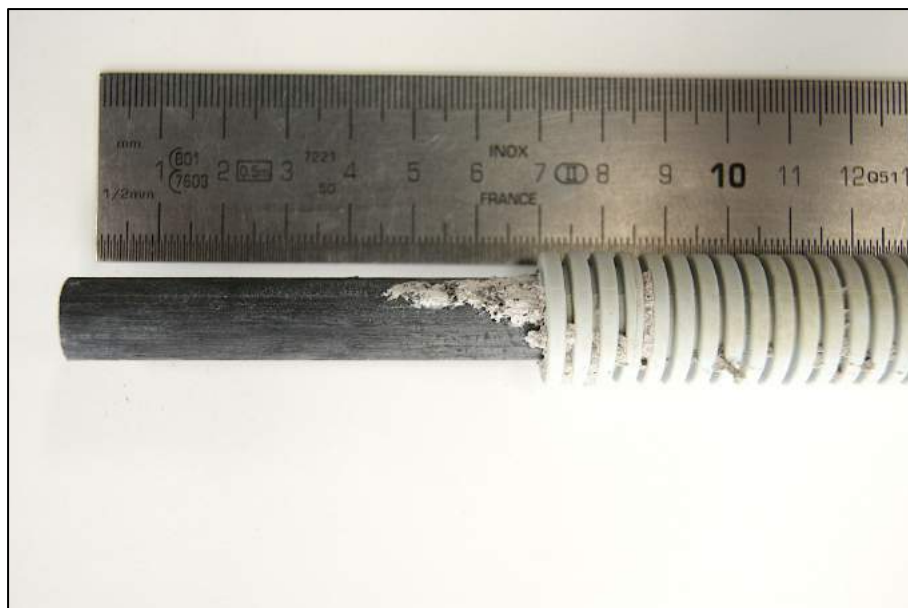
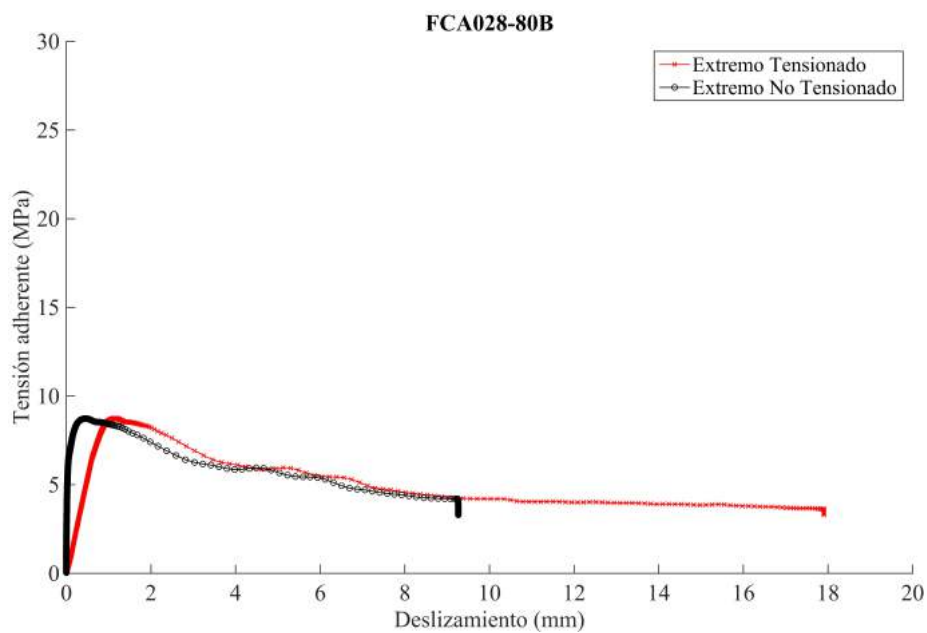


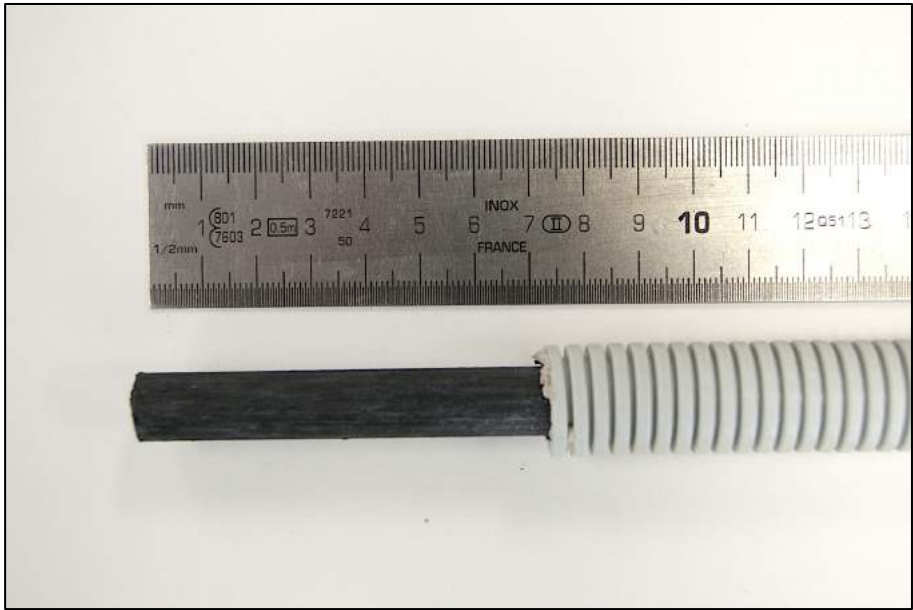
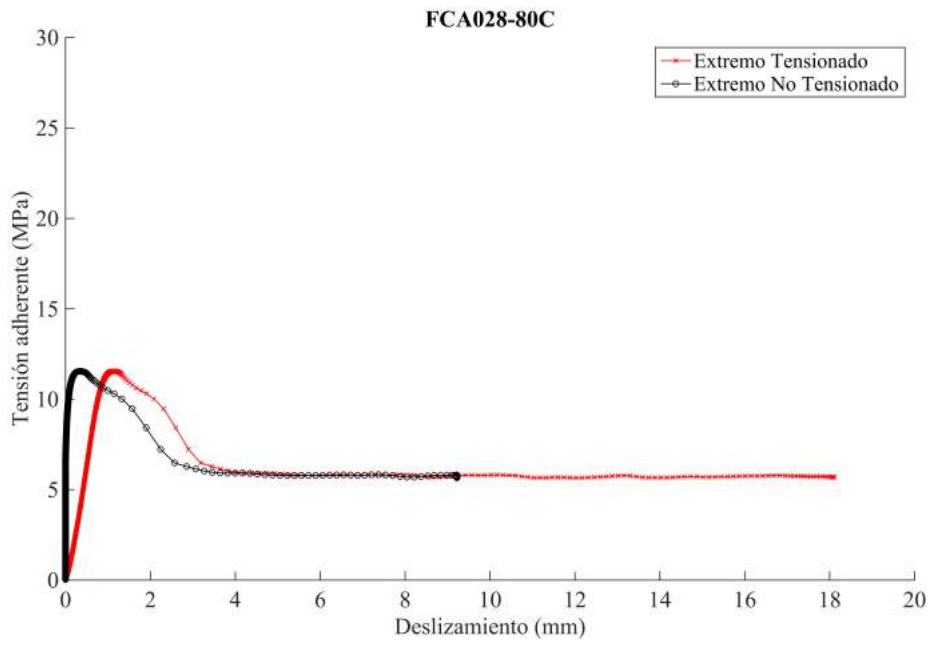


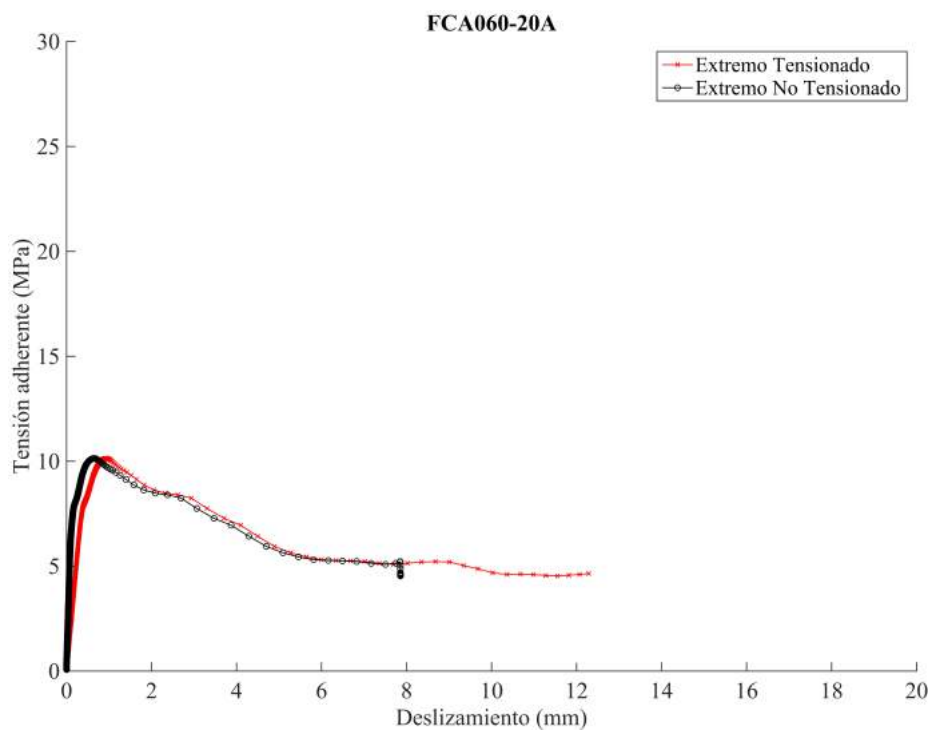


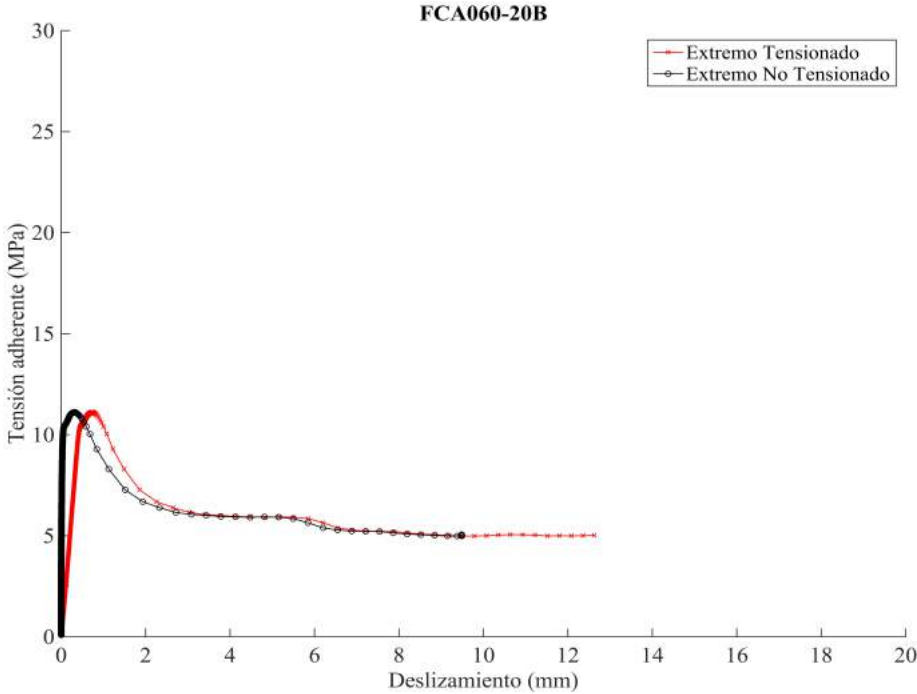


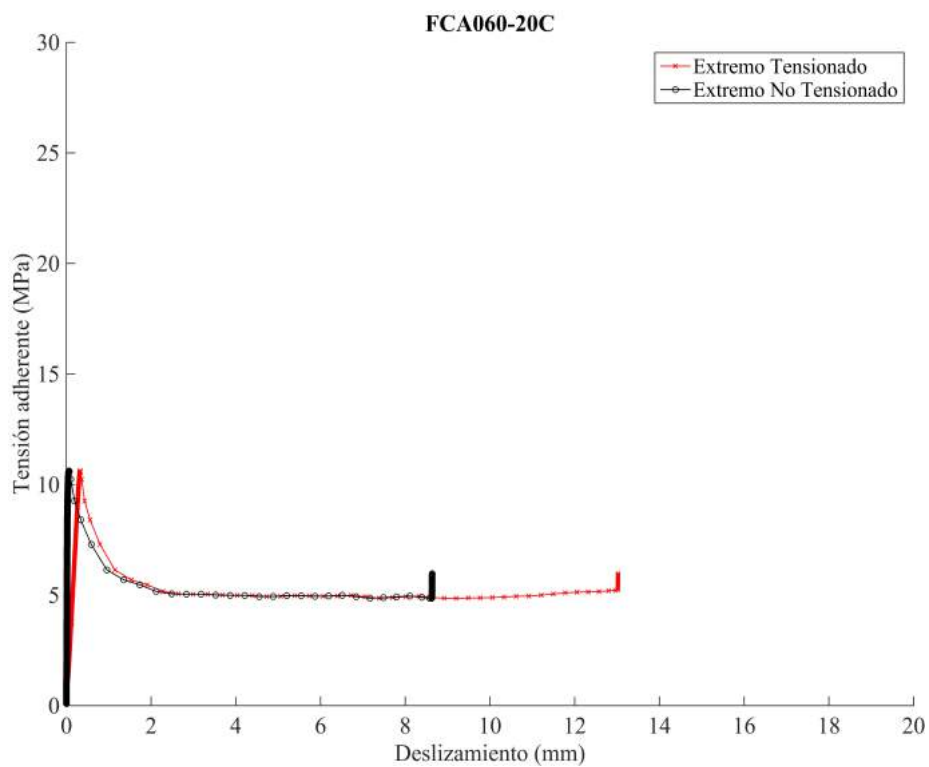


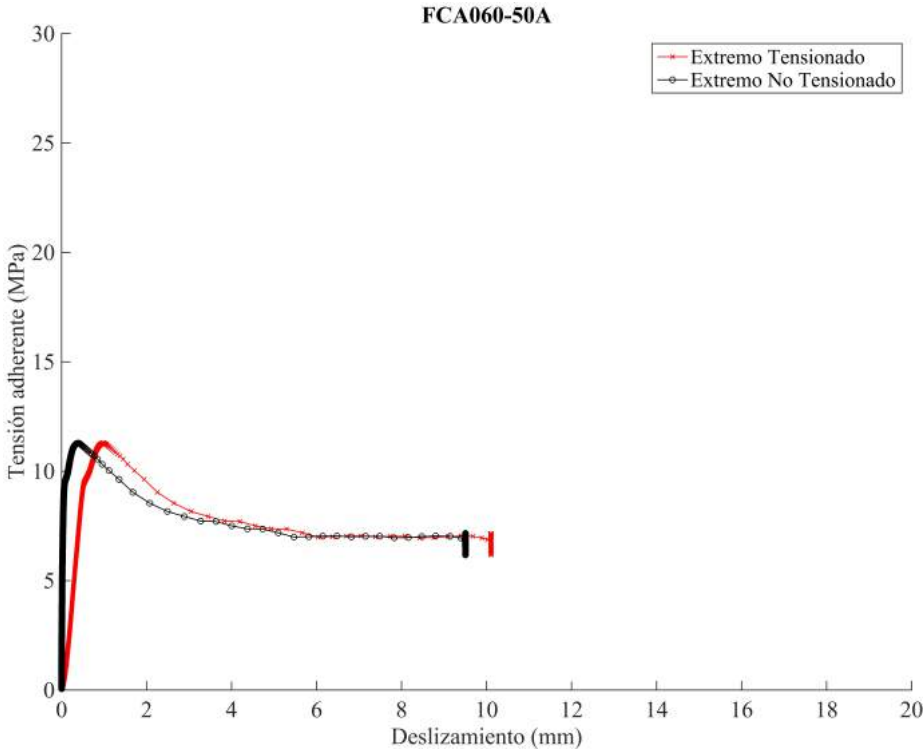


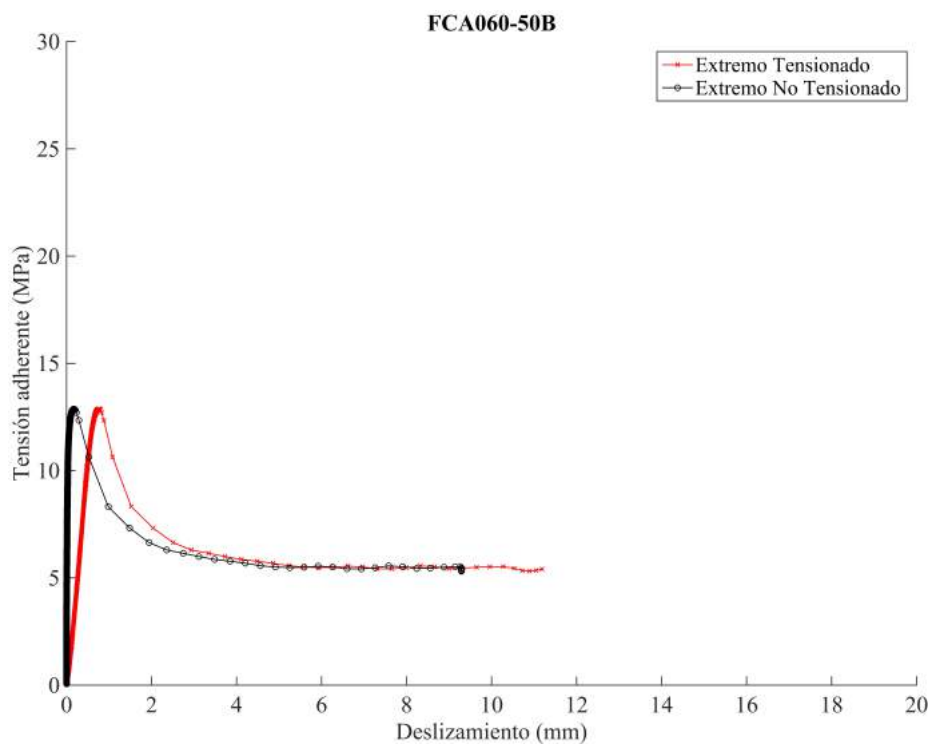




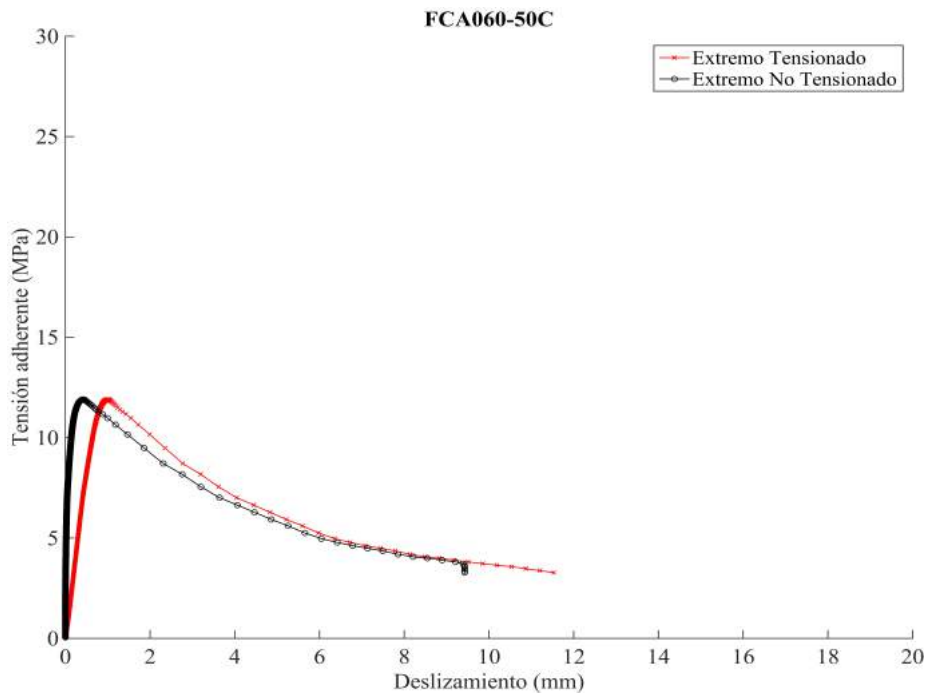




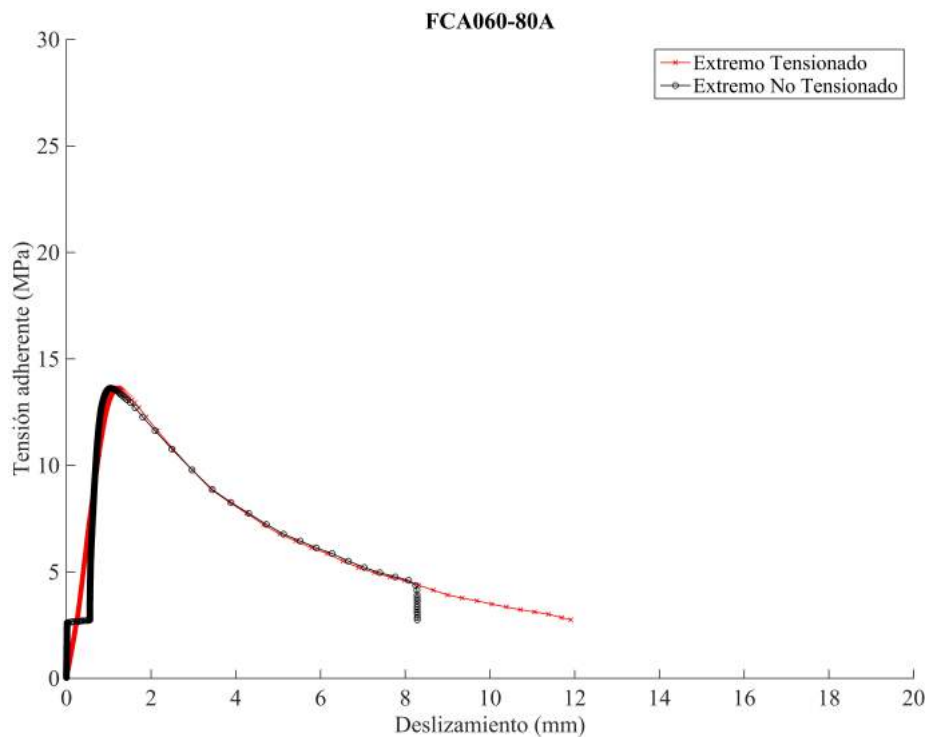


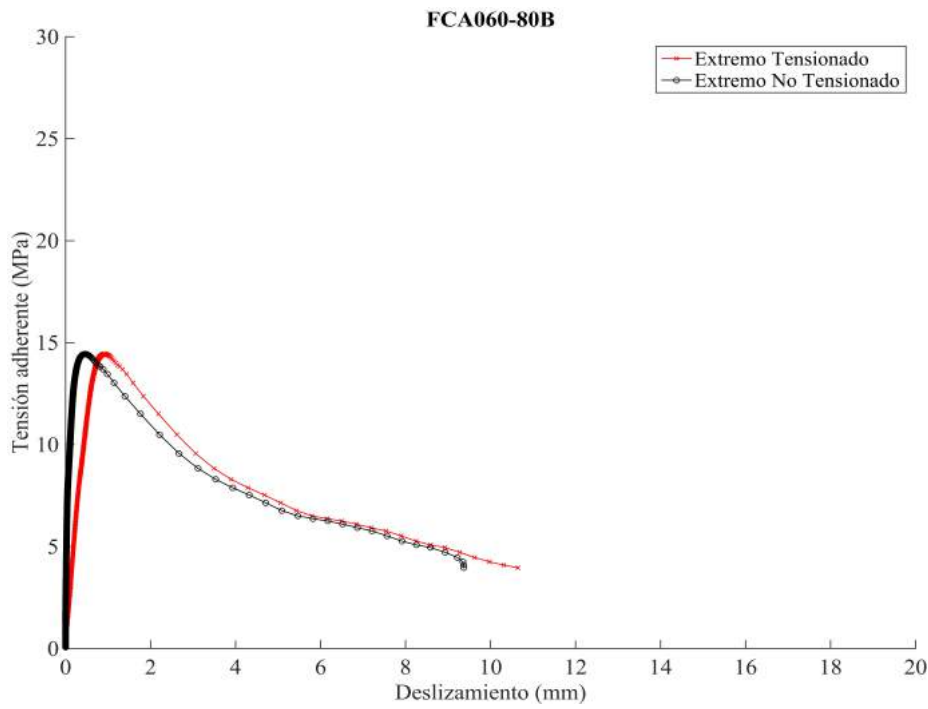


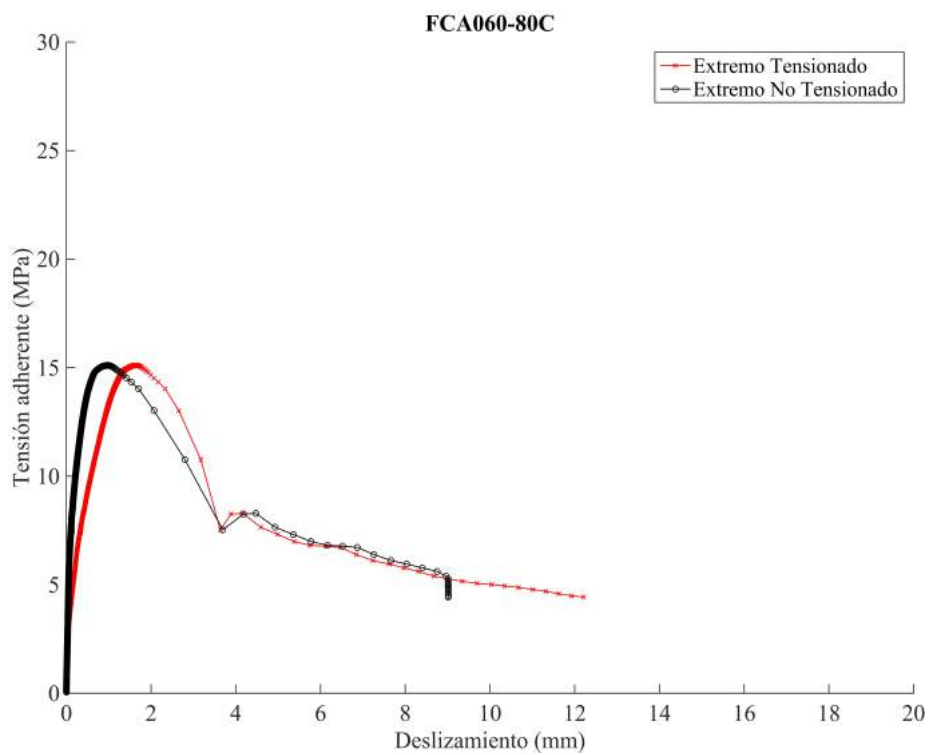


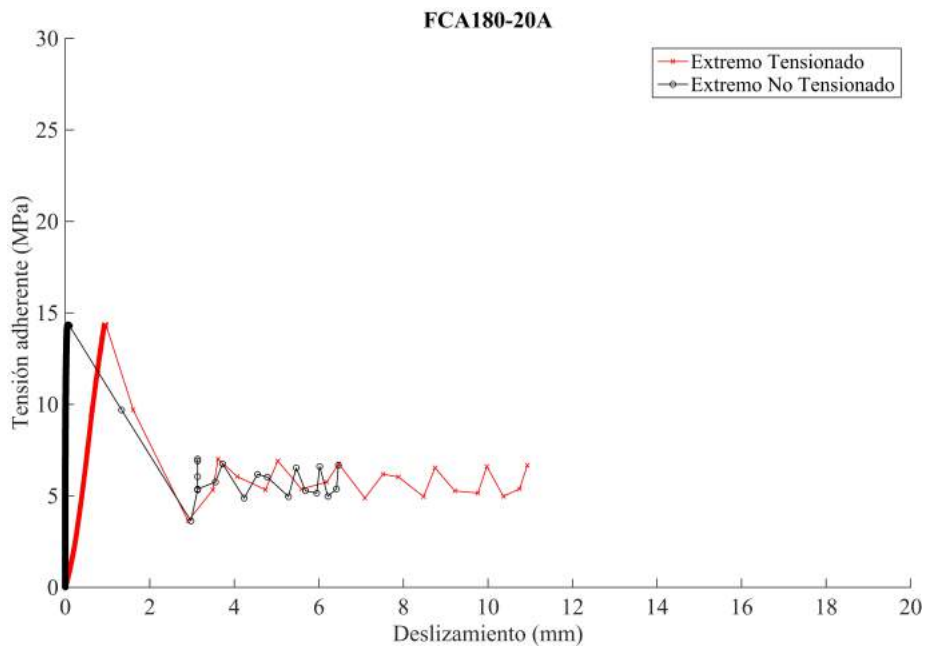


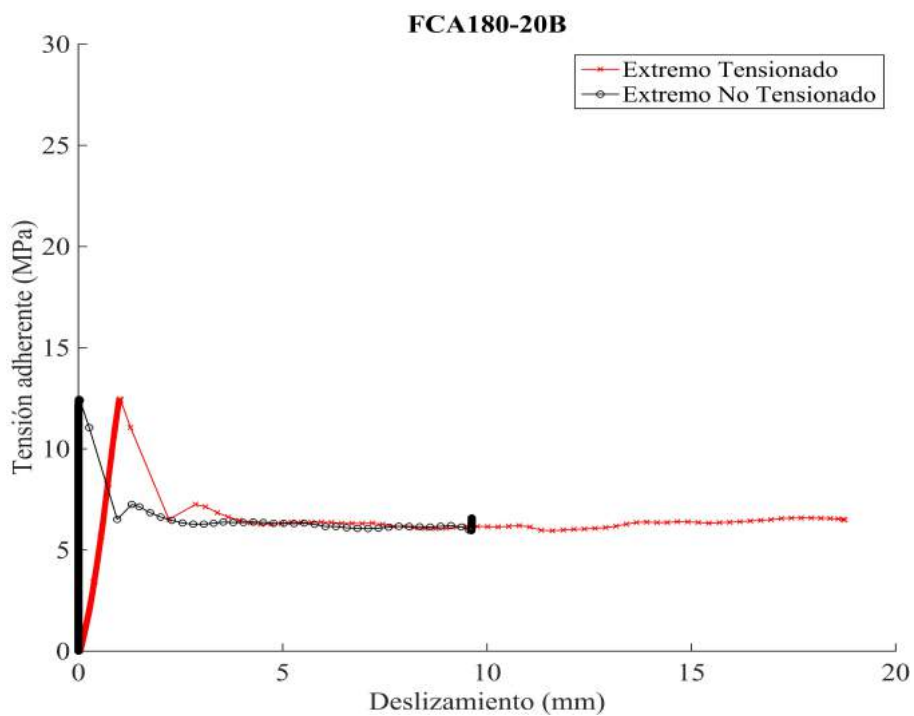


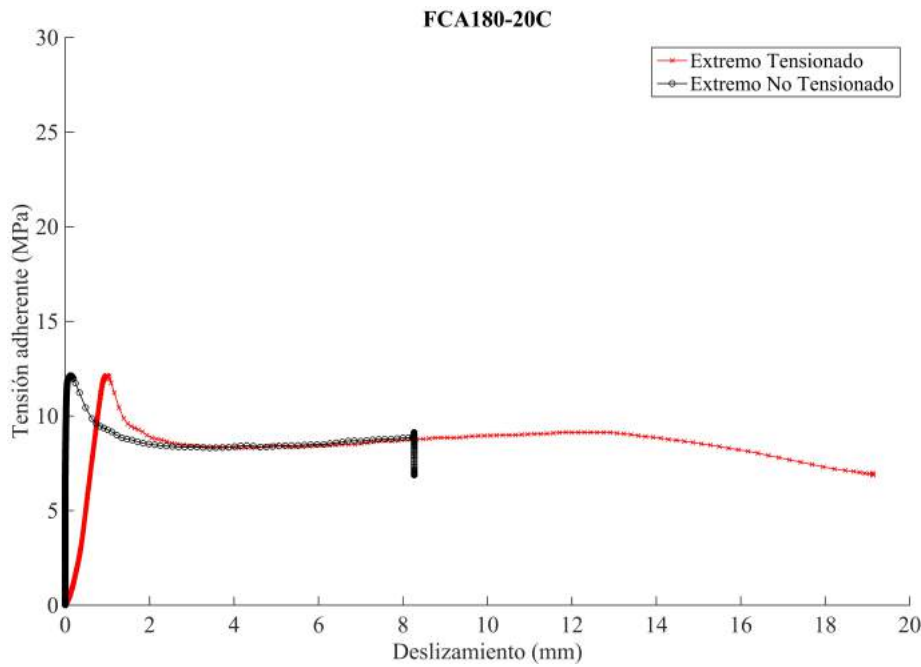




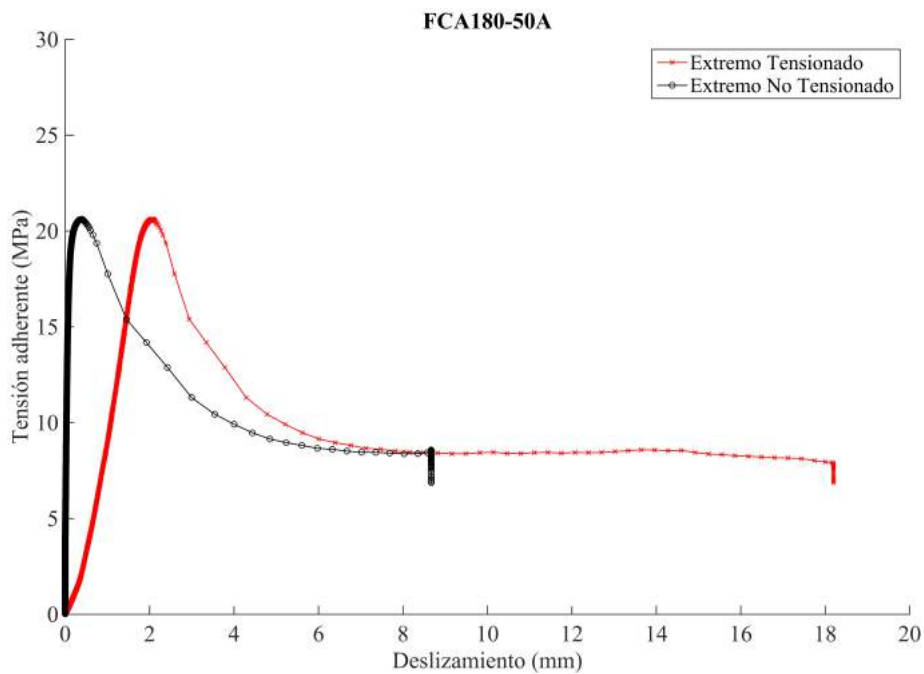


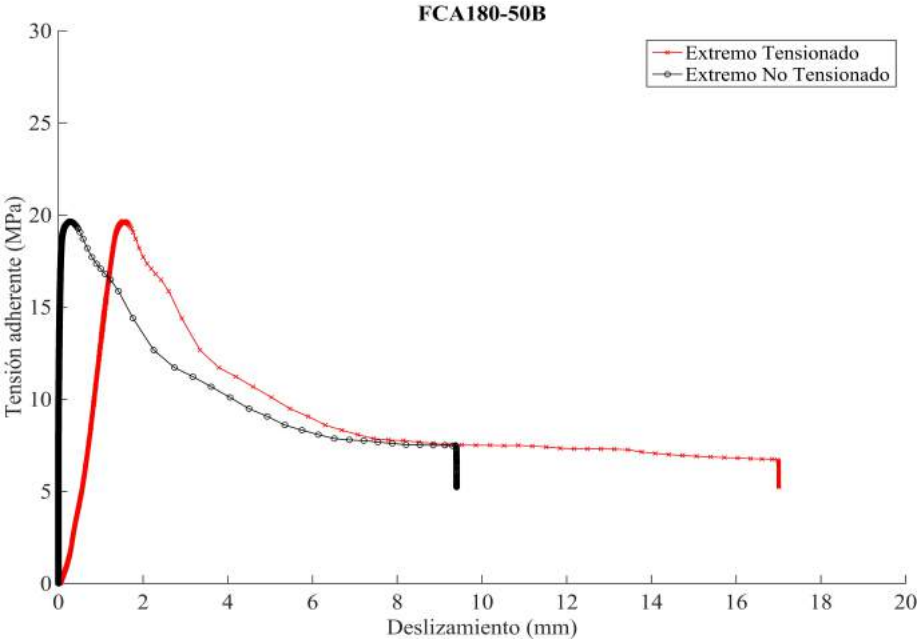




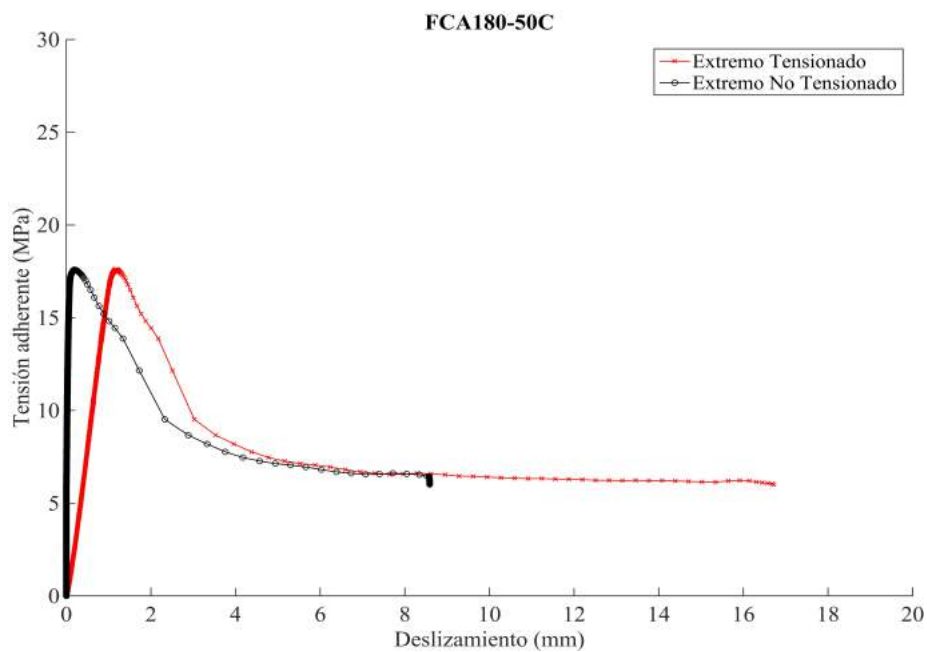


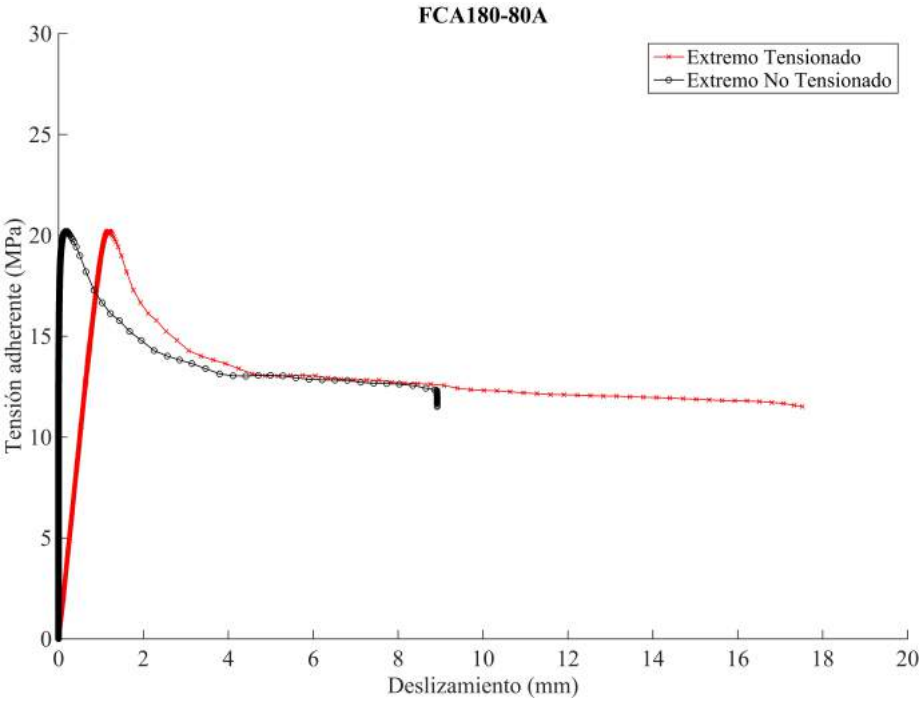


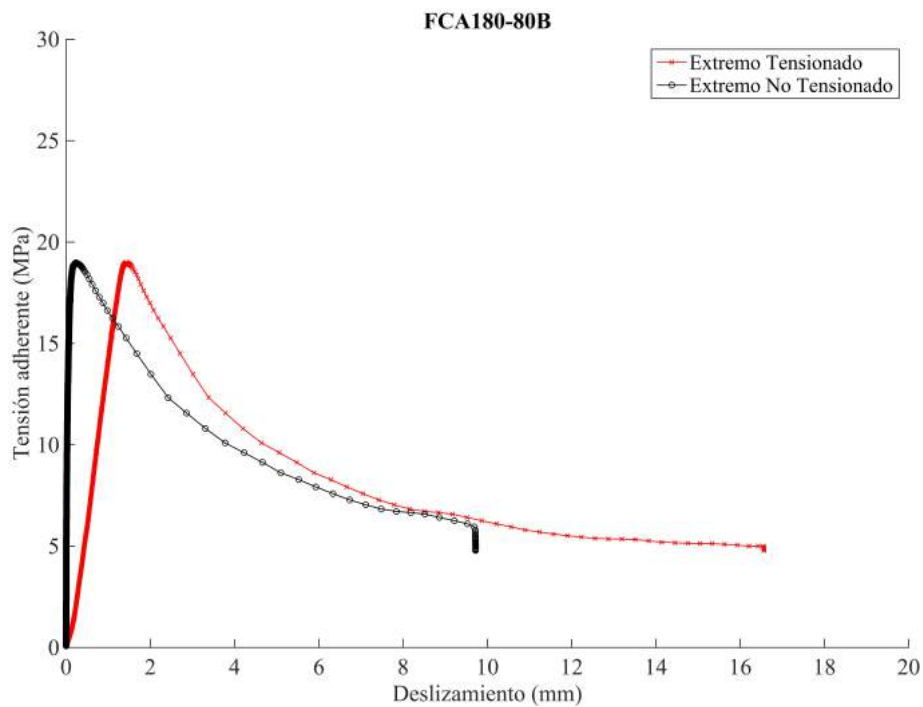


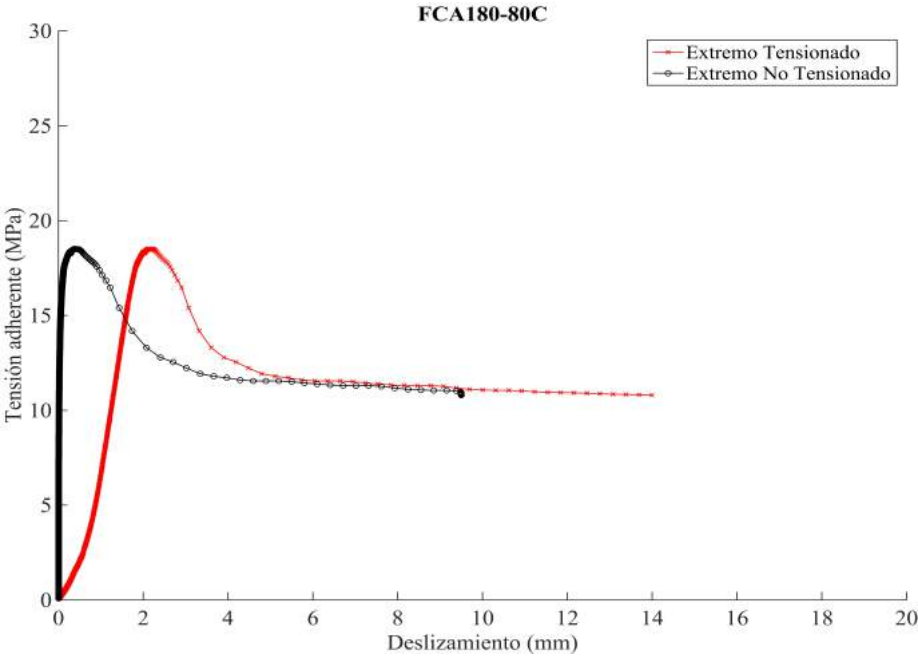












## 8 ANEXO II. SCRIPTS PARA ANÁLISIS DE DATOS CON MATLAB

Se aportan los ”*scripts*”, rutinas de programación, para Matlab R2014b, de MathWorks, Inc., para la gestión de importantes volúmenes de datos.

Los *scripts* seleccionados permiten la realización de gráficas por tipología de barra, edad y temperatura, así como cualquier combinación entre ellas, de modo que agilizan los procesos, permitiendo un mayor y más exhaustivo análisis de los datos obtenidos por la prensa de ensayo de pullout. Para facilitar su implementación, se ha compilado en una única rutina de programación todos los scripts elaborados y utilizados en el tratamiento de datos de esta tesis, incorporando un código QR para que se pueda descargar y utilizar directamente, con las oportunas modificaciones propias de cada trabajo de investigación.



Fig. 8.1 .- QR para descarga de compilación de scripts para MatLab R2014b

```

% REPRESENTACIÓN GRAFICAS CONJUNTAS POR TIPO Y TEMPERATURA
% FCA
% PULLOUT Calcula la Tensión máxima soportada, depurando la
tabla origen para poder representarla.

clc
clear

lc=20

% SELECCI" N TABLA ORIGEN

D=xlsread('/Users/FERNANDO/Documents/MATLAB/98_FCA028-
20A_Gr·ficas.xls',1);

% el=input('L·mite El·stico: ');

% BARRA FCA d14

cb= 43.01;
ab= 147.22;
db= 13.69;
la= 69;
lca= 131;
lf=lc+40.31+lca;
el= 132444;

% CALCULA FUERZA M·XIMA SOPORTADA

a1=D(:,2);

[nn,p]=max(a1);

% p es la FILA de Fm·x

[m,n]=size(D);

% AJUSTE ENT

mm_ant=D(2,12);

if mm_ant<0
    mm_ant=-mm_ant;

```

```
end

for i=2:m
    mm=D(i,12);

    if mm>0

        if mm>=mm_ant;

            D(i,16)=mm;
            mm_ant=mm;

        else
            D(i,16)=mm_ant;
        end

    else

        D(i,16)=mm_ant;

    end

    % AJUSTE ET1  (1 de 3)

    et1_ant=D(2,13);
    et1=D(i,13);

    if et1_ant<0
        D(i,17)=0;
    else D(i,17)=et1;
    end

    % AJUSTE ET2  (2 de 3)

    et2_ant=D(2,14);
    et2=D(i,14);

    if et2_ant<0
        D(i,18)=0;
    else D(i,18)=et2;
    end

    % AJUSTE ET3  (3 de 3)
```

```

et3_ant=D(2,15);
et3=D(i,15);

if et3_ant<0
    D(i,19)=0;
else D(i,19)=et3;
end

end

% CAPTADORES CONSIDERADOS EN LA MEDIA DE ENT

if D(2,13)<0
    D(p,17)=0

end

if D(2,14)<0
    D(p,18)=0

end

if D(2,15)<0
    D(p,19)=0

end

% TENSI"N ADHERENTE

for i=2:m

    D(i,20)=D(i,2)*1000/cb/la;
    W=[D(i,17),D(i,18),D(i,19)];
    z=3-numel(W(W==0));
    D(i,21)=(D(i,17)+D(i,18)+D(i,19))/z;

end

% CALCULA DEFORMACI"N ET

etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z

```



```
sc=nn*1000*lf/(el*ab)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET restando la deformación elástica de
la barra

etf=etm-sc
% TENSIÓN ADHERENTE MÌXIMA

t=nn*1000/cb/la

% RESULTADO TENSIÓN MÌXIMA

% CALCULA DEFORMACIÓN ENT

ent=D(p,16)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET

etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z

sc=nn*1000*lf/(el*ab)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET restando la deformación elástica de
la barra

etf=etm-sc

% TENSIÓN ADHERENTE MÌXIMA
fprintf('Tensiòn Adherente')
t=nn*1000/cb/la
z
M=[nn,t,ent,etf]

% DIBUJAR GRÀFICA

hold on
% X1 ES LA TENSIÓN ADHERENTE EN CADA PUNTO
x1=D(:,20);
% X2 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO NO TENSIONADO
x2=D(:,12);
% X3 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO TENSIONADO
x3=D(:,21);

%plot (x3,x1,'-xr')
plot (x2,x1,'-.xy')
```

```

axis([0 20 0 30])
xlabel ('Deslizamiento (mm)')
ylabel ('Tensión adherente (MPa)')

% SELECCIÓN TABLA ORIGEN

D=xlsread('/Users/FERNANDO/Documents/MATLAB/98_FCA028-
50A_Gr ficas.xls',1);

% el=input('L mite Elástico: ');

% BARRA FCA d14

cb= 43.01;
ab= 147.22;
db= 13.69;
la= 69;
lca= 131;
lf=lc+40.31+lca;
el= 132444;

% CALCULA FUERZA M XIMA SOPORTADA

a1=D(:,2);

[nn,p]=max(a1);

% p es la FILA de Fm x

[m,n]=size(D);

% AJUSTE ENT

mm_ant=D(2,12);

if mm_ant<0
    mm_ant=-mm_ant;
end

for i=2:m

    mm=D(i,12);

```

```
if mm>0

    if mm>=mm_ant;

        D(i,16)=mm;
        mm_ant=mm;

    else
        D(i,16)=mm_ant;
    end

else

    D(i,16)=mm_ant;

end

% AJUSTE ET1 (1 de 3)

et1_ant=D(2,13);
et1=D(i,13);

if et1_ant<0
    D(i,17)=0;
else D(i,17)=et1;
end

% AJUSTE ET2 (2 de 3)

et2_ant=D(2,14);
et2=D(i,14);

if et2_ant<0
    D(i,18)=0;
else D(i,18)=et2;
end

% AJUSTE ET3 (3 de 3)

et3_ant=D(2,15);
et3=D(i,15);

if et3_ant<0
    D(i,19)=0;
else D(i,19)=et3;
```

```
end
```

```
end
```

```
% CAPTADORES CONSIDERADOS EN LA MEDIA DE ENT
```

```
if D(2,13)<0
    D(p,17)=0
```

```
end
```

```
if D(2,14)<0
    D(p,18)=0
```

```
end
```

```
if D(2,15)<0
    D(p,19)=0
```

```
end
```

```
% TENSI"N ADHERENTE
```

```
for i=2:m
```

```
    D(i,20)=D(i,2)*1000/cb/la;
    W=[D(i,17),D(i,18),D(i,19)];
    z=3-numel(W(W==0));
    D(i,21)=(D(i,17)+D(i,18)+D(i,19))/z;
```

```
end
```

```
% CALCULA DEFORMACI"N ET
```

```
etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z
```

```
sc=nn*1000*lf/(el*ab)
```

```
% CALCULA DEFORMACI"N ET restando la deformaci"n el"stica de  
la barra
```

```
etf=etm-sc
```

```
% TENSI"N ADHERENTE M"XIMA
```

```
t=nn*1000/cb/la

% RESULTADO TENSIÓN MÍXIMA

% CALCULA DEFORMACIÓN ENT
ent=D(p,16)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET
etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z
sc=nn*1000*lf/(el*ab)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET restando la deformación elástica de
la barra
etf=etm-sc

% TENSIÓN ADHERENTE MÍXIMA
fprintf('Tensión Adherente')
t=nn*1000/cb/la
z
M=[nn,t,ent,etf]

% DIBUJAR GRÁFICA

hold on
% X1 ES LA TENSIÓN ADHERENTE EN CADA PUNTO
x1=D(:,20);
% X2 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO NO TENSIONADO
x2=D(:,12);
% X3 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO TENSIONADO
x3=D(:,21);

%plot (x3,x1,'-xb')
plot (x2,x1,'-.xc')

axis([0 20 0 30])
%title ('FCC028-50A')
xlabel ('Deslizamiento (mm)')
ylabel ('Tensión adherente (MPa)')

% SELECCIÓN TABLA ORIGEN
```

```

D=xlsread('/Users/FERNANDO/Documents/MATLAB/98_FCA028-
80A_Gr·ficas.xls',1);

% el=input('L·mite El·stico: ');

% BARRA FCA d14

cb= 43.01;
ab= 147.22;
db= 13.69;
la= 69;
lca= 131;
lf=lc+40.31+lca;
el= 132444;

% CALCULA FUERZA M·XIMA SOPORTADA

a1=D(:,2);

[nn,p]=max(a1);

% p es la FILA de Fm·x

[m,n]=size(D);

% AJUSTE ENT

mm_ant=D(2,12);

if mm_ant<0
    mm_ant=-mm_ant;
end

for i=2:m

    mm=D(i,12);

    if mm>0

        if mm>=mm_ant;

            D(i,16)=mm;

```

```
mm_ant=mm;

else
    D(i,16)=mm_ant;
end

else

    D(i,16)=mm_ant;

end

% AJUSTE ET1 (1 de 3)

et1_ant=D(2,13);
et1=D(i,13);

if et1_ant<0
    D(i,17)=0;
else D(i,17)=et1;
end

% AJUSTE ET2 (2 de 3)

et2_ant=D(2,14);
et2=D(i,14);

if et2_ant<0
    D(i,18)=0;
else D(i,18)=et2;
end

% AJUSTE ET3 (3 de 3)

et3_ant=D(2,15);
et3=D(i,15);

if et3_ant<0
    D(i,19)=0;
else D(i,19)=et3;
end

end
```

```
% CAPTADORES CONSIDERADOS EN LA MEDIA DE ENT
```

```
if D(2,13)<0
    D(p,17)=0
```

```
end
```

```
if D(2,14)<0
    D(p,18)=0
```

```
end
```

```
if D(2,15)<0
    D(p,19)=0
```

```
end
```

```
% TENSI" N ADHERENTE
```

```
for i=2:m
```

```
    D(i,20)=D(i,2)*1000/cb/la;
    W=[D(i,17),D(i,18),D(i,19)];
    z=3-numel(W(W==0));
    D(i,21)=(D(i,17)+D(i,18)+D(i,19))/z;
```

```
end
```

```
% CALCULA DEFORMACI" N ET
```

```
etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z
```

```
sc=nn*1000*lf/(el*ab)
```

```
% CALCULA DEFORMACI" N ET restando la deformaci" n el"stica de  
la barra
```

```
etf=etm-sc
```

```
% TENSI" N ADHERENTE M"XIMA
```

```
t=nn*1000/cb/la
```

```
% RESULTADO TENSI" N M"XIMA
```



```
% CALCULA DEFORMACIÓN ENT
ent=D(p,16)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET
etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z
sc=nn*1000*lf/(el*ab)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET restando la deformación elástica de
la barra
etf=etm-sc

% TENSIÓN ADHERENTE MÁXIMA
fprintf('Tensión Adherente')
t=nn*1000/cb/la
z
M=[nn,t,ent,etf]

% DIBUJAR GRÁFICA

hold on
% X1 ES LA TENSIÓN ADHERENTE EN CADA PUNTO
x1=D(:,20);
% X2 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO NO TENSIONADO
x2=D(:,12);
% X3 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO TENSIONADO
x3=D(:,14);

%plot (x3,x1,'-xg')
plot (x2,x1,'-.xm')

axis([0 18 0 12])
xlabel ('Deslizamiento (mm)')
ylabel ('Tensión adherente (MPa)')

% REPRESENTACIÓN GRÁFICAS CONJUNTAS POR TIPO Y TEMPERATURA
% FCC
% PULLOUT Calcula la Tensión máxima soportada, depurando la
tabla origen
% para poder representarla.

clc
clear

lc=20
```

```

% SELECCI" N TABLA ORIGEN

D=xlsread('/Users/FERNANDO/Documents/MATLAB/98_FCC028-
20A_Gr•ficas.xls',1);

% el=input('L•mite El•stico: ');

% BARRA FCC d12

cb= 33.35;
ab= 88,51;
db= 10.61;
la= 54;
lca= 146;
lf=lc+40.31+lca;
el= 120868;

% CALCULA FUERZA M•XIMA SOPORTADA

a1=D(:,2);

[nn,p]=max(a1);

% p es la FILA de Fm•x

[m,n]=size(D);

% AJUSTE ENT

mm_ant=D(2,12);

if mm_ant<0
    mm_ant=-mm_ant;
end

for i=2:m

    mm=D(i,12);

    if mm>0

```

```
    if mm>=mm_ant;

        D(i,16)=mm;
        mm_ant=mm;

    else
        D(i,16)=mm_ant;
    end

else

    D(i,16)=mm_ant;

end

% AJUSTE ET1  (1 de 3)

et1_ant=D(2,13);
et1=D(i,13);

if et1_ant<0
    D(i,17)=0;
else D(i,17)=et1;
end

% AJUSTE ET2  (2 de 3)

et2_ant=D(2,14);
et2=D(i,14);

if et2_ant<0
    D(i,18)=0;
else D(i,18)=et2;
end

% AJUSTE ET3  (3 de 3)

et3_ant=D(2,15);
et3=D(i,15);

if et3_ant<0
    D(i,19)=0;
else D(i,19)=et3;
end

end
```

```

% CAPTADORES CONSIDERADOS EN LA MEDIA DE ENT

if D(2,13)<0
    D(p,17)=0
end

if D(2,14)<0
    D(p,18)=0
end

if D(2,15)<0
    D(p,19)=0
end

% TENSI"N ADHERENTE

for i=2:m

    D(i,20)=D(i,2)*1000/cb/la;
    W=[D(i,17),D(i,18),D(i,19)];
    z=3-numel(W(W==0));
    D(i,21)=(D(i,17)+D(i,18)+D(i,19))/z;
end

% CALCULA DEFORMACI"N ET

etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z

sc=nn*1000*lf/(el*ab)

% CALCULA DEFORMACI"N ET restando la deformaci"n el.stica de
la barra

etf=etm-sc
% TENSI"N ADHERENTE MÌXIMA

t=nn*1000/cb/la

```

```
% RESULTADO TENSIÓN MÌXIMA

% CALCULA DEFORMACIÓN ENT
ent=D(p,16)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET
etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z

sc=nn*1000*lf/(el*ab)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET restando la deformación elástica de
la barra
etf=etm-sc

% TENSIÓN ADHERENTE MÌXIMA
fprintf('Tensión Adherente')
t=nn*1000/cb/la
z
M=[nn,t,ent,etf]

% DIBUJAR GRÀFICA

hold on
% X1 ES LA TENSIÓN ADHERENTE EN CADA PUNTO
x1=D(:,20);
% X2 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO NO TENSIONADO
x2=D(:,12);
% X3 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO TENSIONADO
x3=D(:,21);

%plot (x3,x1,'-xr')
plot (x2,x1,'-or')

axis([0 20 0 25])
xlabel ('Deslizamiento (mm)')
ylabel ('Tensión adherente (MPa)')

% SELECCIÓN TABLA ORIGEN

D=xlsread('/Users/FERNANDO/Documents/MATLAB/98_FCC028-
50A_Gràficas.xls',1);
```

```

% el=input('Límite Elástico: ');

% BARRA FCC d12

cb= 33.35;
ab= 88,51;
db= 10.61;
la= 54;
lca= 146;
lf=lc+40.31+lca;
el= 120868;

% CALCULA FUERZA MÀXIMA SOPORTADA

a1=D(:,2);

[nn,p]=max(a1);

% p es la FILA de Fm·x

[m,n]=size(D);

% AJUSTE ENT

mm_ant=D(2,12);

if mm_ant<0
    mm_ant=-mm_ant;
end

for i=2:m

    mm=D(i,12);

    if mm>0

        if mm>=mm_ant;

            D(i,16)=mm;
            mm_ant=mm;

        else
            D(i,16)=mm_ant;

```

```
end

else

    D(i,16)=mm_ant;

end

% AJUSTE ET1 (1 de 3)

et1_ant=D(2,13);
et1=D(i,13);

if et1_ant<0
    D(i,17)=0;
else D(i,17)=et1;
end

% AJUSTE ET2 (2 de 3)

et2_ant=D(2,14);
et2=D(i,14);

if et2_ant<0
    D(i,18)=0;
else D(i,18)=et2;
end

% AJUSTE ET3 (3 de 3)

et3_ant=D(2,15);
et3=D(i,15);

if et3_ant<0
    D(i,19)=0;
else D(i,19)=et3;
end

end

% CAPTADORES CONSIDERADOS EN LA MEDIA DE ENT
```

```

if D(2,13)<0
    D(p,17)=0

end

if D(2,14)<0
    D(p,18)=0

end

if D(2,15)<0
    D(p,19)=0

end

% TENSI" N ADHERENTE

for i=2:m

    D(i,20)=D(i,2)*1000/cb/la;
    W=[D(i,17),D(i,18),D(i,19)];
    z=3-numel(W(W==0));
    D(i,21)=(D(i,17)+D(i,18)+D(i,19))/z;

end

% CALCULA DEFORMACI" N ET

etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z

sc=nn*1000*lf/(el*ab)

% CALCULA DEFORMACI" N ET restando la deformaci" n el"stica de
la barra

etf=etm-sc
% TENSI" N ADHERENTE M"XIMA

t=nn*1000/cb/la

% RESULTADO TENSI" N M"XIMA

% CALCULA DEFORMACI" N ENT

```



```
ent=D(p,16)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET
etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z

sc=nn*1000*lf/(el*ab)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET restando la deformación elástica de
la barra
etf=etm-sc

% TENSIÓN ADHERENTE MÀXIMA
fprintf('Tensión Adherente')
t=nn*1000/cb/la
z
M=[nn,t,ent,etf]

% DIBUJAR GRÀFICA

hold on
% X1 ES LA TENSIÓN ADHERENTE EN CADA PUNTO
x1=D(:,20);
% X2 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO NO TENSIONADO
x2=D(:,12);
% X3 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO TENSIONADO
x3=D(:,21);

%plot (x3,x1,'-xb')
plot (x2,x1,'--ob')

axis([0 20 0 25])
%title ('FCC028-50A')
xlabel ('Deslizamiento (mm)')
ylabel ('Tensión adherente (MPa)')

% SELECCIÓN TABLA ORIGEN

D=xlsread('/Users/FERNANDO/Documents/MATLAB/98_FCC028-
80A_Gràficas.xls',1);

% el=input('LÌmite Elástico: ');

% BARRA FCC d12
```

```

cb= 33.35;
ab= 88,51;
db= 10.61;
la= 54;
lca= 146;
lf=lc+40.31+lca;
el= 120868;

% CALCULA FUERZA MÌXIMA SOPORTADA

a1=D(:,2);

[nn,p]=max(a1);

% p es la FILA de Fm·x

[m,n]=size(D);

% AJUSTE ENT

mm_ant=D(2,12);

if mm_ant<0
    mm_ant=-mm_ant;
end

for i=2:m

    mm=D(i,12);

    if mm>0

        if mm>=mm_ant;

            D(i,16)=mm;
            mm_ant=mm;

        else
            D(i,16)=mm_ant;
        end

    else

```

```
D(i,16)=mm_ant;

end

% AJUSTE ET1 (1 de 3)

et1_ant=D(2,13);
et1=D(i,13);

if et1_ant<0
    D(i,17)=0;
else D(i,17)=et1;
end

% AJUSTE ET2 (2 de 3)

et2_ant=D(2,14);
et2=D(i,14);

if et2_ant<0
    D(i,18)=0;
else D(i,18)=et2;
end

% AJUSTE ET3 (3 de 3)

et3_ant=D(2,15);
et3=D(i,15);

if et3_ant<0
    D(i,19)=0;
else D(i,19)=et3;
end

end

% CAPTADORES CONSIDERADOS EN LA MEDIA DE ENT

if D(2,13)<0
    D(p,17)=0
end

if D(2,14)<0
```

```

    D(p,18)=0

end

if D(2,15)<0
    D(p,19)=0
end

% TENSIÓN ADHERENTE

for i=2:m

    D(i,20)=D(i,2)*1000/cb/la;
    W=[D(i,17),D(i,18),D(i,19)];
    z=3-numel(W(W==0));
    D(i,21)=(D(i,17)+D(i,18)+D(i,19))/z;
end

% CALCULA DEFORMACIÓN ET

etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z

sc=nn*1000*lf/(el*ab)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET restando la deformación elástica de
la barra

etf=etm-sc
% TENSIÓN ADHERENTE MÍXIMA

t=nn*1000/cb/la

% RESULTADO TENSIÓN MÍXIMA

% CALCULA DEFORMACIÓN ENT

ent=D(p,16)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET

etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z

```

```
sc=nn*1000*lf/(el*ab)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET restando la deformación elástica de
la barra

etf=etm-sc

% TENSIÓN ADHERENTE MÀXIMA
fprintf('Tensión Adherente')
t=nn*1000/cb/la
z
M=[nn,t,ent,etf]

% DIBUJAR GRÀFICA

hold on
% X1 ES LA TENSIÓN ADHERENTE EN CADA PUNTO
x1=D(:,20);
% X2 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO NO TENSIONADO
x2=D(:,12);
% X3 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO TENSIONADO
x3=D(:,14);

%plot (x3,x1,'-xg')
plot (x2,x1,'-og')

axis([0 10 0 24])
%title ('FCC028-80A')
xlabel ('Deslizamiento (mm)')
ylabel ('Tensión adherente (MPa)')

% A C E R O

% SELECCIÓN TABLA ORIGEN

D=xlsread('/Users/FERNANDO/Documents/MATLAB/98_ACC028-
20A_Gràficas.xls',1);

% el=input('LÌmite Elástico: ');

% BARRA ACC d12
```

```

cb= 38.48;
ab= 117,83;
db= 12.25;
la= 61;
lca= 139;
lf=lc+40.31+lca;
el= 200614;

```

```

% CALCULA FUERZA MÌXIMA SOPORTADA

```

```

a1=D(:,2);

[nn,p]=max(a1);

% p es la FILA de Fm·x

[m,n]=size(D);

```

```

% AJUSTE ENT

```

```

mm_ant=D(2,12);

if mm_ant<0
    mm_ant=-mm_ant;
end

for i=2:m

    mm=D(i,12);

    if mm>0

        if mm>=mm_ant;

            D(i,16)=mm;
            mm_ant=mm;

        else
            D(i,16)=mm_ant;
        end

    else

```

```
D(i,16)=mm_ant;

end

% AJUSTE ET1 (1 de 3)

et1_ant=D(2,13);
et1=D(i,13);

if et1_ant<0
    D(i,17)=0;
else D(i,17)=et1;
end

% AJUSTE ET2 (2 de 3)

et2_ant=D(2,14);
et2=D(i,14);

if et2_ant<0
    D(i,18)=0;
else D(i,18)=et2;
end

% AJUSTE ET3 (3 de 3)

et3_ant=D(2,15);
et3=D(i,15);

if et3_ant<0
    D(i,19)=0;
else D(i,19)=et3;
end

end

% CAPTADORES CONSIDERADOS EN LA MEDIA DE ET

if D(2,13)<0
    D(p,17)=0
end

if D(2,14)<0
```

```

    D(p,18)=0

end

if D(2,15)<0
    D(p,19)=0
end

% TENSI" N ADHERENTE

for i=2:m

    D(i,20)=D(i,2)*1000/cb/la;
    W=[D(i,17),D(i,18),D(i,19)];
    z=3-numel(W(W==0));
    D(i,21)=(D(i,17)+D(i,18)+D(i,19))/z;
end

% CALCULA DEFORMACI" N ET

etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z

sc=nn*1000*lf/(el*ab)

% CALCULA DEFORMACI" N ET restando la deformaci" n el"stica de
la barra

etf=etm-sc
% TENSI" N ADHERENTE M"XIMA

t=nn*1000/cb/la

% RESULTADO TENSI" N M"XIMA

% CALCULA DEFORMACI" N ENT

ent=D(p,16)

% CALCULA DEFORMACI" N ET

etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z

```



```
sc=nn*1000*lf/(el*ab)

% CALCULA DEFORMACIÓN ET restando la deformación elástica de
la barra

etf=etm-sc

% TENSIÓN ADHERENTE MÀXIMA
fprintf('Tensi3n Adherente')
t=nn*1000/cb/la
z
M=[nn,t,et,etf]

% DIBUJAR GRÀFICA

hold on
% X1 ES LA TENSI3N ADHERENTE EN CADA PUNTO
x1=D(:,20);
% X2 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO NO TENSIONADO
x2=D(:,12);
% X3 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO TENSIONADO
x3=D(:,21);

%plot (x3,x1,'-xr')
plot (x2,x1,'*k')

axis([0 20 0 30])
xlabel ('Deslizamiento (mm)')
ylabel ('Tensi3n adherente (MPa)')

% SELECCI3N TABLA ORIGEN

D=xlsread('/Users/FERNANDO/Documents/MATLAB/98_ACC028-
50A_Gràficas.xls',1);

% el=input('LÌmite Elàstico: ');

% BARRA ACC d12

cb= 38.48;
ab= 117,83;
db= 12.25;
la= 61;
lca= 139;
lf=lc+40.31+lca;
```

```
e1= 200614;

% CALCULA FUERZA MÀXIMA SOPORTADA

a1=D(:,2);

[nn,p]=max(a1);

% p es la FILA de Fm·x

[m,n]=size(D);

% AJUSTE ENT

mm_ant=D(2,12);

if mm_ant<0
    mm_ant=-mm_ant;
end

for i=2:m

    mm=D(i,12);

    if mm>0

        if mm>=mm_ant;

            D(i,16)=mm;
            mm_ant=mm;

        else
            D(i,16)=mm_ant;
        end

    else

        D(i,16)=mm_ant;

    end

    % AJUSTE ET1  (1 de 3)
```

```
et1_ant=D(2,13);  
et1=D(i,13);
```

```
if et1_ant<0  
    D(i,17)=0;  
else D(i,17)=et1;  
  
end
```

```
% AJUSTE ET2   (2 de 3)
```

```
et2_ant=D(2,14);  
et2=D(i,14);
```

```
if et2_ant<0  
    D(i,18)=0;  
else D(i,18)=et2;  
end
```

```
% AJUSTE ET3   (3 de 3)
```

```
et3_ant=D(2,15);  
et3=D(i,15);
```

```
if et3_ant<0  
    D(i,19)=0;  
else D(i,19)=et3;  
end
```

```
end
```

```
% CAPTADORES CONSIDERADOS EN LA MEDIA DE ENT
```

```
if D(2,13)<0  
    D(p,17)=0
```

```
end
```

```
if D(2,14)<0  
    D(p,18)=0
```

```
end
```

```
if D(2,15)<0
```

```

D(p,19)=0

end

% TENSI" N ADHERENTE

for i=2:m

    D(i,20)=D(i,2)*1000/cb/la;
    W=[D(i,17),D(i,18),D(i,19)];
    z=3-numel(W(W==0));
    D(i,21)=(D(i,17)+D(i,18)+D(i,19))/z;
end

% CALCULA DEFORMACI" N ET

etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z

sc=nn*1000*lf/(el*ab)

% CALCULA DEFORMACI" N ET restando la deformaci" n el"stica de
la barra

etf=etm-sc
% TENSI" N ADHERENTE M"XIMA

t=nn*1000/cb/la

% RESULTADO TENSI" N M"XIMA

% CALCULA DEFORMACI" N ENT

ent=D(p,16)

% CALCULA DEFORMACI" N ET

etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z

sc=nn*1000*lf/(el*ab)

% CALCULA DEFORMACI" N ET restando la deformaci" n el"stica de
la barra

```

```
etf=etm-sc

% TENSI" N ADHERENTE MXIMA
fprintf('Tensión Adherente')
t=nn*1000/cb/la
z
M=[nn,t,ent,etf]

% DIBUJAR GRÁFICA

hold on
% X1 ES LA TENSI" N ADHERENTE EN CADA PUNTO
x1=D(:,20);
% X2 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO NO TENSIONADO
x2=D(:,12);
% X3 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO TENSIONADO
x3=D(:,21);

%plot (x3,x1,'-xb')
plot (x2,x1,':^k')

axis([0 15 0 15])
%title ('FCC028-50A')
xlabel ('Deslizamiento (mm)')
ylabel ('Tensión adherente (MPa)')

% SELECCI" N TABLA ORIGEN

D=xlsread('/Users/FERNANDO/Documents/MATLAB/98_ACC028-
80A_Grficas.xls',1);

% el=input('Lmite Elástico: ');

% BARRA ACC d12

cb= 38.48;
ab= 117,83;
db= 12.25;
la= 61;
lca= 139;
lf=lc+40.31+lca;
el= 200614;

% CALCULA FUERZA MXIMA SOPORTADA
```

```

a1=D(:,2);

[nn,p]=max(a1);

% p es la FILA de Fm·x

[m,n]=size(D);

% AJUSTE ENT

mm_ant=D(2,12);

if mm_ant<0
    mm_ant=-mm_ant;
end

for i=2:m

    mm=D(i,12);

    if mm>0

        if mm>=mm_ant;

            D(i,16)=mm;
            mm_ant=mm;

        else
            D(i,16)=mm_ant;
        end

    else

        D(i,16)=mm_ant;

    end

    % AJUSTE ET1 (1 de 3)

    et1_ant=D(2,13);
    et1=D(i,13);

    if et1_ant<0
        D(i,17)=0;
    end

```

```
else D(i,17)=et1;
```

```
end
```

```
% AJUSTE ET2 (2 de 3)
```

```
et2_ant=D(2,14);
```

```
et2=D(i,14);
```

```
if et2_ant<0
```

```
    D(i,18)=0;
```

```
else D(i,18)=et2;
```

```
end
```

```
% AJUSTE ET3 (3 de 3)
```

```
et3_ant=D(2,15);
```

```
et3=D(i,15);
```

```
if et3_ant<0
```

```
    D(i,19)=0;
```

```
else D(i,19)=et3;
```

```
end
```

```
end
```

```
% CAPTADORES CONSIDERADOS EN LA MEDIA DE ENT
```

```
if D(2,13)<0
```

```
    D(p,17)=0
```

```
end
```

```
if D(2,14)<0
```

```
    D(p,18)=0
```

```
end
```

```
if D(2,15)<0
```

```
    D(p,19)=0
```

```
end
```

```
% TENSIÓN ADHERENTE
```

```
for i=2:m
```

```
    D(i,20)=D(i,2)*1000/cb/la;
    W=[D(i,17),D(i,18),D(i,19)];
    z=3-numel(W(W==0));
    D(i,21)=(D(i,17)+D(i,18)+D(i,19))/z;
```

```
end
```

```
% CALCULA DEFORMACIÓN ET
```

```
etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z
```

```
sc=nn*1000*lf/(el*ab)
```

```
% CALCULA DEFORMACIÓN ET restando la deformación elástica de  
la barra
```

```
etf=etm-sc
```

```
% TENSIÓN ADHERENTE MÁXIMA
```

```
t=nn*1000/cb/la
```

```
% RESULTADO TENSIÓN MÁXIMA
```

```
% CALCULA DEFORMACIÓN ENT
```

```
ent=D(p,16)
```

```
% CALCULA DEFORMACIÓN ET
```

```
etm=(D(p,17)+D(p,18)+D(p,19))/z
```

```
sc=nn*1000*lf/(el*ab)
```

```
% CALCULA DEFORMACIÓN ET restando la deformación elástica de  
la barra
```

```
etf=etm-sc
```

```
% TENSIÓN ADHERENTE MÁXIMA
```

```
fprintf('Tensión Adherente')
```

```
t=nn*1000/cb/la
```

```
z
```



```
M=[nn,t,ent,etf]

% DIBUJAR GRÁFICA

hold on
% X1 ES LA TENSIÓN ADHERENTE EN CADA PUNTO
x1=D(:,20);
% X2 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO NO TENSIONADO
x2=D(:,12);
% X3 ES EL DESPLAZAMIENTO EN EXTREMO TENSIONADO
x3=D(:,14);

%plot (x3,x1,'-xg')
plot (x2,x1,':dk')

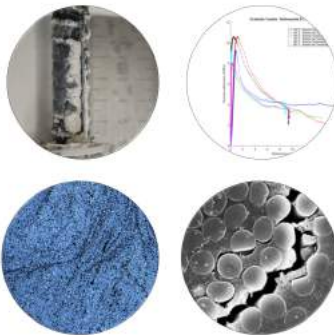
axis([0 10 0 21])
xlabel ('Deslizamiento (mm)')
ylabel ('Tensión adherente (MPa)')
```



La necesidad de mitigar los efectos de la corrosión en las estructuras de hormigón armado, y hacerlo de forma permanente, ha llevado a la propuesta de sustitución de las barras de acero por otros materiales que respondan adecuadamente ante la presencia de agua sin desarrollar procesos corrosivos. Uno de estos materiales es la barra de polímero reforzado con fibras de carbono (CFRP).

El presente trabajo estudia el comportamiento adherente de este tipo de barras ante elevadas temperaturas y durante largos periodos de tiempo.

Se ha desarrollado un plan experimental consistente en una serie de ensayos de pullout y compresión a diferentes edades días y condiciones térmicas, tanto en barras de CFRP con tratamientos superficiales de arenado y corrugado, como en barras de acero corrugado, completando el estudio con ensayos de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía de fuerza atómica (AFM) de las muestras ensayadas a pullout.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA